

**OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE GEOPOLÍMEROS, SINTETIZADOS A
PARTIR DE CENIZA VOLANTE Y PIEDRA PÓMEZ, UTILIZADOS PARA EL
DESARROLLO Y MEJORAMIENTO DEL CONCRETO**

DIANA CATALINA CASTRO RODRÍGUEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
BUCARAMANGA,
2010**

**OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE GEOPOLÍMEROS, SINTETIZADOS A
PARTIR DE CENIZA VOLANTE Y PIEDRA PÓMEZ, UTILIZADOS PARA EL
DESARROLLO Y MEJORAMIENTO DEL CONCRETO**

DIANA CATALINA CASTRO RODRÍGUEZ

**Trabajo de grado presentado como requisito
para optar al título de Química**

Director

ÁNGELA MARCELA MONTAÑO ANGARITA, Química Ph.D.

Codirector

CLAUDIA GONZÁLEZ CUERVO, Física Ph.D

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE QUÍMICA

BUCARAMANGA

2010

DEDICATORIA

A Dios por ser mi guía y mi fortaleza, por darme la sabiduría para desarrollar correctamente cada una de las etapas de mi vida, a mi mamá Elsa María, mi papá Nicolás, mis hermanos Daniel y Marcela y a mi sobrinito David, que me acompañaron durante todo el desarrollo de este proyecto y me brindaron su amor y confianza y a mis amigos por el apoyo incondicional.

*“Pon en manos del Señor todas tus obras, y tus proyectos se
cumplirán”*

Proverbios 16:3 NVI.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a Dios por darme la fortaleza de llevar a cabo esta investigación y por acompañarme en cada momento de mi vida.

A mi directora y amiga Ángela Marcela Montaña por su apoyo incondicional, por los conocimientos que me brindo y por escucharme cuando más lo necesitaba.

A mi mamá Elsa María y a mi padre Nicolás Castro, por el amor que me han brindado durante todas las etapas de mi vida, a mis hermanos Marcela y Daniel por su compañía y apoyo. A mi novio Carlos por la ayuda brindada durante el proyecto.

A los compañeros del Laboratorio de Química Industrial por permitirme su espacio para desarrollar algunas de las actividades de mi proyecto, especialmente al Profesor José Carlos Gutiérrez por los consejos brindados durante la realización del proyecto.

A los compañeros del Laboratorio de Difracción de Rayos-X, por su incondicional apoyo en el tiempo de realización de este proyecto, especialmente a Jesús Andelfo Pinilla.

Y a todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron desinteresadamente en la realización de este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1 MARCO DE REFERENCIA	19
1.1 ESTADO DEL ARTE.....	19
1.2 MARCO TEÓRICO	20
1.2.1 Geopolímero.....	20
1.2.2 Aluminosilicatos.....	23
1.2.3 Concreto.....	25
1.2.4 Diseño de la mezcla.....	30
1.2.5 Concreto Reforzado	32
1.2.6 Técnicas a utilizar.....	33
2 PARTE EXPERIMENTAL	37
2.1 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LOS ALUMINOSILICATOS ..	37
2.1.1 Análisis por difracción de rayos X	37
2.1.2 Análisis por Espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FT-IR) 39	
2.2 SÍNTESIS DE LOS GEOPOLÍMEROS	39
2.3 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LOS GEOPOLÍMEROS	41
2.3.1 Análisis por difracción de rayos X	41
2.3.2 Análisis por Espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FT-IR) 42	
2.4 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL CEMENTO	42
2.4.1 Análisis por difracción de rayos X	42

2.4.2	Análisis por Espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FT-IR)	43
2.5	ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS	43
2.5.1	Diseño de mezcla	44
2.5.2	Construcción de las probetas	46
2.5.3	Proceso de fraguado	48
2.6	CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS DE CONCRETO	49
2.6.1	Mecánica	49
2.6.2	Química	50
2.6.3	Eléctrica	50
3	ANÁLISIS DE RESULTADOS	54
3.1	CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICO DE LOS ALUMINOSILICATOS	54
3.2	CARACTERIZACIÓN POR ESPECTROSCOPIA INFRARROJA DE TRANSFORMADA DE FOURIER (FT-IR) DE LOS ALUMINOSILICATOS	57
3.3	SÍNTESIS DE LOS GEOPOLÍMEROS	58
3.4	CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LOS GEOPOLÍMEROS	60
3.4.1	Análisis por difracción de Rayos x	60
3.4.2	Caracterización por espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FT-IR) de los geopolímeros	68
3.5	CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS DE CONCRETO	69
3.5.1	Análisis mecánico (Resistencia a la compresión)	69
3.5.2	Análisis químico (Resistencia a los sulfatos)	73
3.5.3	Análisis eléctrico (Proceso de corrosión)	73
4	CONCLUSIONES	75
5	RECOMENDACIONES	77

6	BIBLIOGRAFÍA.....	78
	ANEXOS.....	85

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Clasificación de las estructuras de los polisialatos con sus respectivas aplicaciones.	21
Tabla 1.2 Cambios ocurridos en el proceso de clinkerización dentro del horno rotatorio.....	27
Tabla 1.3 Compuestos del cemento portland.....	28
Tabla 2.1 Condiciones de medida de DRX.	38
Tabla 2.2 Descripción de los materiales empleados para la elaboración de las probetas.	43
Tabla 2.3 Parámetros de diseño para las probetas de referencia.....	45
Tabla 2.4 Parámetros de diseño para las probetas de la primera fase (sustitución del agregado fino).	45
Tabla 2.5 Parámetros de diseño para las probetas de la segunda fase (sustitución de cemento en un 10, 20 y 30%).	46
Tabla 3.1 Fases cristalinas de las cenizas volantes.	54
Tabla 3.2 Fases cristalinas de la piedra pómez.	55
Tabla 3.3 Resultados del refinamiento del GC 12M.....	65
Tabla 3.4 Resultados del refinamiento del GP 3M.....	67

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Semi-esqueleto de la estructura de un Na-PSS por Barbosa.	22
Figura 1.2 Estructura de un Na-PSS por Davidovits.	22
Figura 2.1 Cenizas Volantes	37
Figura 2.2 Piedra Pómez	37
Figura 2.3 Montaje llenado lateral	38
Figura 2.4 Procedimiento para la obtención del geopolímero a partir de la ceniza volante.	40
Figura 2.5 Procedimiento para la obtención del geopolímero a partir de la piedra pómez.	40
Figura 2.6 Cilindros empleados para la elaboración de las probetas.....	47
Figura 2.7 Preparación de la mezcla.	47
Figura 2.8 Probetas obtenidas.	48
Figura 2.9 Probetas sumergidas en agua para el proceso de fraguado.	48
Figura 2.10 Máquina universal de ensayos INSOLTEC LTDA.....	49
Figura 2.11 Probetas para el proceso de corrosión.	51
Figura 2.12 Ambiente de corrosión.	51
Figura 2.13 Equipo utilizado para el análisis de corrosión.	52
Figura 3.1 Patrón DRX de la ceniza volante.	56
Figura 3.2 Patrón DRX de la piedra pómez.	56
Figura 3.3 Espectro infrarrojo de las cenizas.....	57
Figura 3.4 Espectro infrarrojo de la piedra pómez.	58
Figura 3.5 Mecanismo propuesto para la obtención de los geopolímeros GC y GP.	59
Figura 3.6 Difractogramas de los GC.....	61
Figura 3.7 Difractogramas de los GP.....	63
Figura 3.8 Difractograma refinado del GC 12 M.	66
Figura 3.9 Difractograma refinado del GP 3 M.....	68

Figura 3.10 Resistencia de los concretos OPC, GC y GP.70
Figura 3.11 Resistencia del concreto GC.....71
Figura 3.12 Resistencia del concreto GP.....72

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A Composición química de las cenizas obtenidas en diferentes países.	86
Anexo B Composición química general de la Piedra pómez.....	87
Anexo C Análisis cualitativo de las cenizas.	87
Anexo D Análisis cualitativo de la piedra pómez.....	88
Anexo E Análisis cualitativo del GC 3M.	88
Anexo F Análisis cualitativo del GC 7.5M.	89
Anexo G Análisis cualitativo del GC 12M.....	89
Anexo H Análisis cualitativo del GP 3M.	90
Anexo I Análisis cualitativo del GP 7.5M.....	90
Anexo J Análisis cualitativo del GP 12M.....	91
Anexo K Espectro infrarrojo de los GP.	91
Anexo L Espectro infrarrojo de los GC.....	92
Anexo M Análisis cualitativo del Cemento.	92
Anexo N Resultados del refinamiento del Cemento.....	93
Anexo O Difractograma refinado del Cemento.	94
Anexo P Espectro infrarrojo del Cemento.....	94
Anexo Q Probetas desgastadas por la solución saturada de sulfato de sodio.....	95
Anexo R Resistencia a la corrosión del concreto con el 20% de GC 12M.....	95
Anexo S Resistencia a la corrosión del concreto con el 20% de GP 3M.	96
Anexo T Resistencia a la corrosión del concreto patrón.	96

LISTA DE ABREVIATURAS

GC	Geopolimero a base de Ceniza volante
GP	Geopolimero a base de Piedra pómez
DRX	Difracción de Rayos X
ICDD	International Center for Diffraction Data
ICSD	Inorganic Crystal Structure Database
IR	Infrarrojo
PDF-2	Powder Diffraction File
OPC	Cemento Portland
PS	Polisialato
PSS	Polisialato-siloxo
PSDS	Polisialato-disiloxo
C₃S	Silicato tricálcico
C₂S	Silicato dicálcico
C₃A	Aluminio tricálcico
C₄AF	Ferroaluminato tetracálcico
ICONTEC	Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación
ACI	American Concrete Institute
EIS	Espectroscopia de Impedancia Electroquímica
LPR	Resistencia a la Polarización Lineal
ASTM	American Society for Testing Materials
INV	Instituto Nacional de Vías

PUBLICACIONES

Se presentaron algunos apartes del trabajo en el “I Congreso Iberoamericano de Química, Bioquímica e Ingeniería Química, VII Congreso Internacional de Química e Ingeniería Química” el trabajo titulado **“OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE NUEVOS GEOPOLIMEROS PARA EL MEJORAMIENTO DEL CONCRETO”**. El cual fue presentado en la modalidad de presentación oral. Dicho evento se llevó a cabo del 12 al 16 de Octubre del año 2009 en la ciudad de La Habana, Cuba.

También se presentaron algunos aportes del trabajo en el “V Congreso Internacional de Materiales”, el trabajo titulado **“OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE NUEVOS GEOPOLIMEROS DERIVADOS DE CENIZA VOLANTE PARA EL DESARROLLO Y MEJORAMIENTO DEL CONCRETO”**. El cual fue presentado en la modalidad de exposición mural. Dicho evento se llevó a cabo del 12 al 16 de Octubre del año 2009 en la ciudad de Cali, Colombia.

RESUMEN

TITULO: OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE GEOPOLÍMEROS, SINTETIZADOS A PARTIR DE CENIZA VOLANTE Y PIEDRA PÓMEZ, UTILIZADOS PARA EL DESARROLLO Y MEJORAMIENTO DEL CONCRETO.*

AUTORA: CASTRO RODRÍGUEZ, Diana Catalina**

PALABRAS CLAVES: Geopolímeros, Piedra Pómez, Ceniza Volante, Resistencia

Los minerales naturales se utilizan para la producción de geopolímeros mediante el proceso de ataque alcalino. Su incorporación en una cadena geopolimérica permite la posibilidad de desarrollo de paneles de aislamiento (térmico y acústico). La geopolimerización es una manera viable para procesar y agregar valor a los residuos industriales de aluminosilicatos dando lugar a materiales con elevadas resistencias mecánicas. En este trabajo se pretende mejorar las diferentes propiedades observadas en estos materiales, los cuales son sintetizados y agregados en la preparación del concreto.

Los geopolímeros serán producidos con formulas diferentes, bajo condiciones altamente alcalinas, entre un polvo de aluminosilicato y una solución activadora. Como fuente de aluminosilicatos se utiliza: ceniza volante y piedra pómez.

El proyecto plantea la elaboración controlada del material polimérico, obteniéndose un nuevo material que pretenderá tener propiedades similares a las del cemento. El análisis estructural y mecánico detallado, permitirá establecer su eficiencia como material de construcción en diferentes obras civiles, usado como material para mampostería.

Se evaluó el desempeño de concretos hechos a base de geopolimeros sintetizados a partir de la activación alcalina de la ceniza volante y piedra pómez. Los agentes alcalinos empleados para la síntesis, fueron el Hidróxido de Sodio (NaOH) y Silicato de Sodio (Na₂SiO₃).

*Proyecto de Grado

** Facultad de Ciencia, Escuela de Química, Directora: Ángela Marcela Montaña Angarita
Codirectora: Claudia González Cuervo

ABSTRACT

TITLE: OBTAINING AND CHARACTERIZATION GEOPOLYMER, SYNTHESIZED FROM FLY ASH AND PUMICE, USED FOR THE DEVELOPMENT AND IMPROVEMENT OF CONCRETE

AUTHOR: CASTRO RODRÍGUEZ, Diana Catalina**

KEY WORDS: Geopolymer, Pumice Stone, fly ash, Resistance

Natural minerals are used for the production of geopolymer by alkaline attack process. Its incorporation into a string geopolymer allows the possibility of developing insulation panels (thermal and acoustic). The geopolimerización is a viable way to process and add value to industrial waste resulting aluminosilicate materials with high mechanical strength. This paper aims to improve the various properties observed in these materials, which are synthesized and added to the concrete.

The geopolymer will be produced with different formulas, under highly alkaline conditions between aluminosilicate powder and an activator solution. As a source of aluminosilicates is used: fly ash and pumice.

The project involves the controlled development of the polymer, obtaining a new material that will pretend to have properties similar to cement. The detailed structural and mechanical analysis, will establish its efficiency as a building material in various civil works, used as material for masonry.

The performance of concrete made from geopolymer synthesized from the alkali activation of fly ash and pumice. The alkaline agents used for the synthesis were sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate (Na₂SiO₃).

* College thesis

** Faculty of Science, School of Chemistry, Directed by: Ángela Marcela Montaña Angarita
Codirected: Claudia Gonzáles Cuervo

INTRODUCCIÓN

Los polímeros inorgánicos, también conocidos como geopolímeros, son materiales de gran interés en el campo de la construcción [46], ya que presentan altos valores de resistencia, comparados con los reportados por el cemento portland [43]. La materia prima de estos polímeros son los aluminosilicatos, los cuales son fuente de óxidos de silicio y de aluminio, que al ser activados por un agente alcalino producen el geopolímero [48], cuyas características son similares al cemento, permitiendo de esta manera ser utilizados como material cementante. La utilización del polímero reduce el consumo de cemento Portland por unidad de volumen de concreto y confiere a la mezcla propiedades mecánicas y de durabilidad. [1, 43]. Así mismo los geopolimeros ofrecen una disminución en la emisión de grandes volúmenes de sustancias en estado gaseoso (CO_2 y gases de NO_x y SO_x), producidas en el proceso de clinkerización del cemento [2, 8], siendo por esta razón una de las industrias más contaminantes del mundo, por tal razón surge la necesidad de elaborar nuevos materiales que favorezcan a la reducción de las emisiones de CO_2 y de esta manera contribuir a la no contaminación del medio ambiente [49].

El proyecto evaluó el desempeño de concretos hechos a base de geopolimeros sintetizados a partir de la activación alcalina de la ceniza volante y piedra pómez. Los agentes alcalinos empleados para la síntesis, fueron el Hidróxido de Sodio (NaOH) y Silicato de Sodio (Na_2SiO_3). Se planteó la elaboración controlada del material polimérico, obteniéndose un nuevo material que presentó propiedades similares a las del cemento. El análisis estructural y mecánico detallado, permitió establecer su eficiencia como material de construcción en diferentes obras civiles y como material que contribuya a disminuir las emisiones del CO_2 , es decir, la elaboración de un concreto verde que favorezca al medio ambiente.

1 MARCO DE REFERENCIA

1.1 ESTADO DEL ARTE

La geopolimerización es una manera viable para procesar y agregar valor a los residuos industriales de aluminosilicatos, dando lugar a materiales con elevadas resistencias mecánicas [42, 19, 7, 10].

La investigación sobre los procesos de geopolimerización ha aumentado rápidamente debido a la potencial aplicación comercial que presentan. La literatura, especifica las diferencias en la reactividad de los materiales utilizados durante la síntesis de los geopolímeros y cómo afecta de manera significativa las propiedades del geopolímero [4, 5, 6, 9, 19].

Debido a la alta resistencia y predominante microestructura amorfa de los aluminosilicatos empleados en la fabricación del geopolímero, son activados por un agente alcalino, presentándose una transición en los ligantes inorgánicos. Los productos que se forman durante la activación alcalina de los aluminosilicatos [50, 51], presentan fases cristalinas amorfas, las cuales son analizadas por difracción de rayos X [6, 14, 45]. Estos materiales presentan una excelente resistencia a la acción corrosiva de las soluciones de sal [52], poseen altos valores de fuerza y una buena resistencia a las heladas, además, pueden soportar la exposición a temperaturas de hasta unos 600 °C [44].

Los estudios realizados por Xu, Van Deventer y Lukey [3, 12, 55] han demostrado que la utilización de estilbita como principal fuente de óxido de Aluminosilicato, presenta efectos sobre el grado de geopolimerización. El aumento de la proporción de M_2O/H_2O (donde $M=Na$ y/o K) resulta de la disolución de silicato de aluminio y las especies de estilbita/caolinita, que conduce a una mejora en la

resistencia a la compresión del geopolímero. El éxito de la geopolimerización sólo puede producirse por la dispersión homogénea condensada de Na_2SiO_3 en una solución de MOH antes de la adición de sólidos [3,12].

Van Jaarsveld y Van Deventer [4] demuestran que los cationes metálicos alcalinos y alcalinotérreos presentes durante la formación de estructuras de aluminosilicatos, tienen un efecto muy importante en las propiedades físicas y químicas del geopolímero, efectos analizados en geopolímeros sintetizados a partir de cenizas volantes, a través de medidas geológicas, resistencia a la compresión y análisis estructural [4, 53].

1.2 MARCO TEÓRICO

1.2.1 Geopolímero

El término “geopolímero” fue asignado a polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos que proceden de la reacción química conocida como geopolimerización [54], donde el silicio y el aluminio están enlazados tetraédricamente por el intercambio de átomos de oxígeno, formando la unidad básica, el monómero sialato ($\text{O-Si-O}^- \text{-Al-O}$), que lleva un exceso de carga negativa debido a la sustitución de Si^{+4} con Al^{+3} . El balance de cargas en la estructura del polisialato se realiza por cationes de metales alcalinos (K^+ o Na^+) [7].

1.2.1.1 Aplicación de los geopolímeros

La principal aplicación es sustituir el cemento Portland (OPC) [10, 56], el cual es uno de los materiales más empleados en la producción de concreto, debido fundamentalmente, a las excelentes propiedades mecánicas que presenta en estado endurecido. Sin embargo, la producción del OPC es una de las prácticas más contaminantes, por cada tonelada de cemento se produce 0,55 toneladas de CO_2 , el cual se genera por la calcinación de la piedra caliza, compuesta por más

del 60% de Carbonato de Calcio (CaCO_3) [Ecuación 1.1]. Esta producción de CO_2 es 8 veces mayor que las emisiones resultantes de actividades metalúrgicas [8].



1.2.1.2 Estructura química y propiedades de los geopolímeros

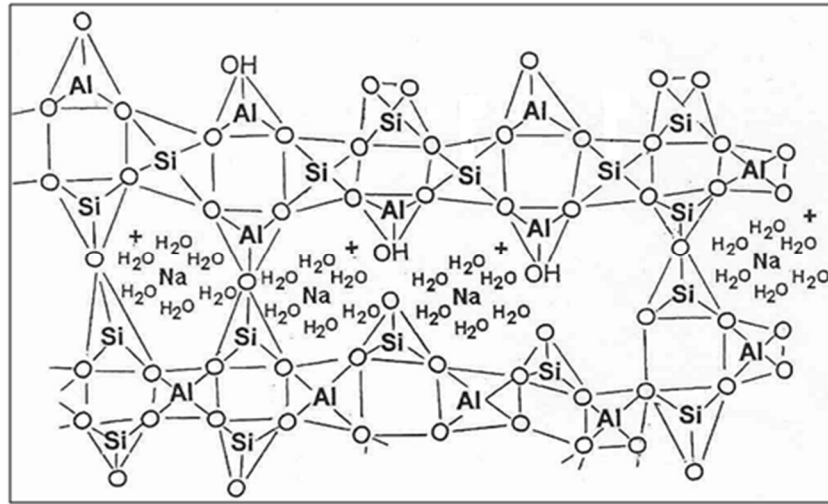
En la estructura del geopolímero, el silicio y el aluminio están enlazados tetraédricamente por el intercambio de átomos de oxígeno, siendo la unidad básica un monómero sialato (O-Si-O-Al-O), con fórmula empírica $\text{Mn}(-(\text{SiO}_2)_z-\text{AlO}_2)_n \cdot w\text{H}_2\text{O}$ donde z es 1,2,3, M es un catión monovalente, como el potasio o el sodio y n es el grado de policondensación [10, 65]. Debido a la sustitución de átomos de aluminio por silicio se obtienen tres tipos de monómeros para definir los geopolímeros [11]. Davidovits clasificó las formas de los polímeros del $-\text{Si-O-Al-}$ en polisialato (PS), polisialato-siloxo (PSS) y polisialato-disiloxo (PSDS). Las estructuras de los polisialatos y sus respectivas aplicaciones se observan en la tabla 1.1. En las figuras 1.1 y 1.2 se muestran la estructura de un geopolímero.

Tabla 1.1 Clasificación de las estructuras de los polisialatos con sus respectivas aplicaciones.

Clasificación	Estructura del monómero	Aplicación
Polisialato (PS) Si:Al=1:1	$\text{Mn}-(\text{Si-O-Al-O})_n$	<ul style="list-style-type: none"> • Aislamiento térmico • Resistencia al fuego
Polisialato-siloxo (PSS) Si:Al=2:1	$\text{Mn}-(\text{Si-O-Al-O-Si-O})_n$	<ul style="list-style-type: none"> • Refractarios para fundición de aluminio • Cementos de alto rendimiento • Residuos tóxicos • Compuestos resistentes al fuego
Polisialato-disiloxo (PSDS) Si:Al=3:1	$\text{Mn}-(\text{Si-O-Al-O-Si-O-Si-O})_n$	<ul style="list-style-type: none"> • Compuestos resistentes al fuego. • Materiales útiles para su uso en el rango de temperatura 650-1000°C

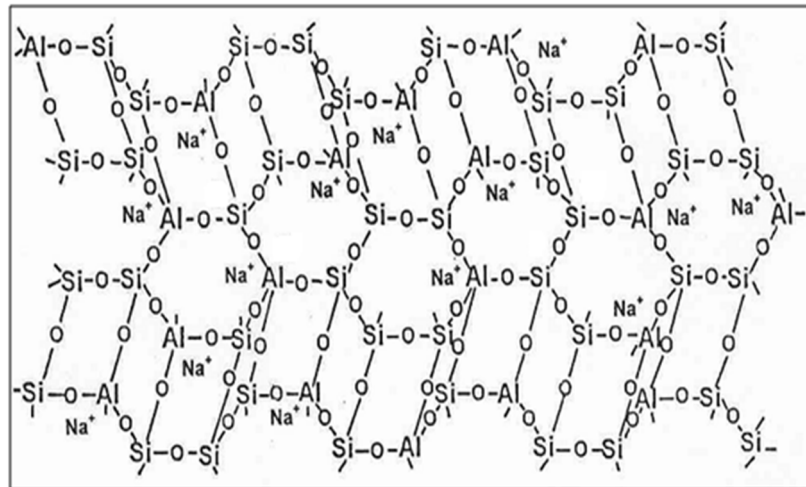
Fuente: DAVIDOVITS J. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials, [10]

Figura 1.1 Semi-esqueleto de la estructura de un Na-PSS por Barbosa.



Fuente: BARBOSA V., MACKENZIE K. and THAUMATURGO C. Synthesis and characterisation of materials base on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. [19].

Figura 1.2 Estructura de un Na-PSS por Davidovits.



Fuente: DAVIDOVITS J. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials [10].

1.2.1.3 Geopolimerización

La geopolimerización es la suma de varias reacciones heterogéneas que tienen lugar al mismo tiempo, en las que se llevan a cabo disolución/hidrólisis, reestructuración y policondensación [12, 66]. La cinética de cada paso varía

según el tipo de aluminosilicato, la concentración de silicato, alcalinos, contenido de agua y las condiciones de reacción. A continuación se describe cada uno de los pasos de la geopolimerización:

1. Paso de la disolución/hidrólisis: La geopolimerización comienza con la disolución continua del precursor de aluminosilicato. El producto de esta disolución es la formación de las especies reactivas $\text{Si}(\text{OH})_4$ y $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, las cuales continúan la geopolimerización [13].
2. Paso de reestructuración: En la solución los precursores de aluminio se orientan para obtener un estado más estable termodinámicamente antes de ocurrir la policondensación [14].
3. Policondensación: en este paso se forman macromoléculas a partir de las especies reactivas formadas en el primer paso. Durante el proceso se obtiene como producto secundario H_2O .

1.2.2 Aluminosilicatos

Como se dijo anteriormente los aluminosilicatos son la materia prima de la síntesis de los geopolímeros [57, 58, 59, 60], compuestos minerales constituidos esencialmente de óxidos de silicio y aluminio con cationes como calcio, magnesio, sodio, potasio, entre otros. La mayoría de las investigaciones sobre geopolímeros han utilizado como precursor la metacaolinita [19, 20, 21, 61], que es obtenida por deshidroxilación de la caolinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

En este trabajo como fuentes de aluminosilicatos se utilizaron, la ceniza volante y la piedra pómez, siendo los componentes mayoritarios el óxido de silicio y el óxido de aluminio en ambos minerales.

1.2.2.1 Cenizas

Las cenizas volantes son el residuo de la combustión del carbón, en el que se obtiene dos clases de cenizas: las cenizas tipo F, tienen un alto contenido de Si y Al y menos del 10% de CaO y cenizas volantes tipo C, tienen bajo contenido de Si,

Al con 20-40% de CaO [16]. Cada año se producen cientos de millones de toneladas de cenizas volantes residuales a nivel mundial, generando un problema por su masiva acumulación, pero ahora han dejado de ser un desecho por las aplicaciones que han surgido para estas cenizas, constituyéndose por el contrario en un material cuyo uso es ambiental y económicamente viable [62, 63, 64].

Se observan grandes diferencias en la composición química de las cenizas dependiendo del lugar de donde provengan, debido al tratamiento realizado en cada termoeléctrica, en el anexo A se muestra la composición química de las cenizas obtenidas en diferentes países. Las propiedades de las cenizas volantes dependen, tanto del tipo de carbón, como de los procesos sufridos en la combustión del mismo; tipo de horno, continuidad en su funcionamiento, sistema de captación, velocidad a la que se realiza el enfriamiento, etc.

Las cenizas utilizadas para este trabajo provienen de la termoeléctrica TERMOZIPA, ubicada en el municipio de Tocancipa departamento de Cundinamarca (Colombia).

1.2.2.2 Piedra pómez

La piedra pómez (también llamada pumita) es una roca ígnea volcánica vítrea, con baja densidad y muy porosa, de color blanco o gris. El origen volcánico le dio ciertas características a la piedra pómez: una multitud de poros y células cerradas que dan por resultado una porosidad con una solidez de grano al mismo tiempo. Debido a su ligereza puede flotar sobre las aguas a causa del aire contenido en sus cavidades. Aparte de eso la piedra pómez es resistente al frío, al fuego y a la intemperie y libre de sales solubles en agua. Las partículas de esta roca volcánica poseen varias formas, predominando las alargadas y las angulosas. Sus poros cerrados le confieren una baja densidad, por lo que el comportamiento al impacto es muy ligero [17]. La piedra pómez comúnmente es utilizada en industrias de la construcción para la fabricación de morteros u hormigones de áridos ligeros, destinados a mejorar las condiciones térmicas y acústicas.

La piedra pómez utilizada para este trabajo proviene de Sabaneta Antioquia (Colombia). En el anexo B se observa la composición general de la piedra pómez.

1.2.3 Concreto

El concreto de uso común se produce mediante la mezcla de tres componentes: cemento portland, arena (agregado fino), grava o piedra triturada (agregado grueso) y agua. La pasta se compone de cemento Portland y agua, la cual une los agregados. El comportamiento mecánico y la durabilidad de este material dependen de tres aspectos básicos:

1. Las características, composición y propiedades de la pasta de cemento endurecida.
2. La calidad propia de los agregados.
3. La afinidad de la matriz cementante con los agregados y su capacidad para trabajar en conjunto.

Para llevar a cabo el proceso de fabricación de la pasta es indispensable seleccionar el cementante apropiado y una relación agua/cemento, que aseguren la calidad de la matriz cementante, la cual constituye del 25 al 40% del volumen total del concreto. En cuanto a los agregados, los cuales constituyen el 60 al 75% del volumen total del concreto, es importante adecuarlos a las funciones que debe desempeñar la estructura [22]. Los agregados se definen en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que pueden llegar hasta 10 mm; los agregados gruesos son aquellos cuyas partículas se retienen en la malla No. 4 y pueden variar hasta 152 mm. El tamaño máximo de agregado que se emplea comúnmente es el de 19 mm o el de 25 mm [47].

1.2.3.1 Cemento

El cemento es un material aglomerante que tiene propiedades de adherencia y cohesión, las cuales le permiten unir fragmentos minerales entre sí, para formar un sólido compacto con resistencia y durabilidad adecuadas. El material cementante más utilizado es el cemento Portland, el cual tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua ya que con ella experimenta una reacción química (hidratación).

El cemento portland se fabrica generalmente a partir de materiales minerales calcáreos, tales como la caliza, alúmina y sílice, que se encuentran como arcilla en la naturaleza.

Las calizas están compuestas por más del 60% de carbonato de calcio (CaCO_3) e impurezas como arcillas, sílice y dolomita. La arcilla está constituida principalmente por un silicato hidratado complejo de aluminio, con porcentajes menores de hierro y otros elementos. La arcilla aporta al proceso los óxidos de sílice (SiO_2), hierro (Fe_2O_3) y aluminio (Al_2O_3).

La química del cemento, es la química de silicatos y aluminatos cálcicos anhidros e hidratados, que se obtiene al someter las materias primas del cemento a un tratamiento térmico ocurrido en grandes hornos rotatorios. En la tabla 1.2 se observan los cambios ocurridos en el proceso de clinkerización dentro del horno rotatorio, observándose la formación de CO_2 durante el proceso.

Tabla 1.2 Cambios ocurridos en el proceso de clinkerización dentro del horno rotatorio.

Temperatura	Proceso	Reacción
Hasta 100°C	Evaporación de H ₂ O libre.	Endotérmica
Por encima de 500°C	Deshidratación de los minerales arcillosos.	Endotérmica
800°C	Liberación de CO₂.	Exotérmica
Por encima de 900°C	Cristalización de los productos minerales descompuestos.	Exotérmica
	Descomposición del carbonato.	Endotérmica
De 900 a 1200°C	Reacción del CaO con los aluminosilicatos.	Exotérmica
De 1250 a 1280°C	Se inicia la formación de líquidos.	Endotérmica
Por encima de 1280°C (hasta 1500°C)	Formación de líquidos y de los compuestos del cemento clinkerización.	Endotérmica

Fuente: SANCHEZ D. Tecnología del concreto y del mortero [23].

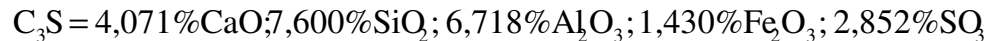
El primer cambio ocurrido en el proceso de clinkerización es la eliminación de agua y liberación de CO₂; posteriormente, el material seco sufre una serie de reacciones químicas hasta que finalmente, en la parte inferior del horno (zona de cocción) un 20 a 30% del material se vuelve líquido y la cal, la sílice y la alúmina vuelven a combinarse. Luego la masa se funde en bolas de diámetro que varían entre 3 y 30mm conocidas como clinker. El clinker calentado al rojo es pasado del horno a un enfriador, en donde su temperatura se baja a 70°C por medio de aire, calentado intensamente se vuelve a usar como aire de combustión en el horno [23]. En la tabla 1.3 se encuentra los compuestos del cemento portland, obtenidos en la clinkerización.

Tabla 1.3 Compuestos del cemento portland.

Nombre del compuesto	Composición del óxido	Abreviatura
Silicato tricálcico	3CaOSiO_2	C_3S
Silicato dicálcico	2CaOSiO_2	C_2S
Aluminio tricálcico	$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaOFe}_2\text{O}_3\text{Al}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fuente: SANCHEZ D. Tecnología del concreto y del mortero [23].

A continuación se da a conocer la composición del cemento, la cual se encuentran en la norma ICONTEC 321 (Especificaciones químicas del cemento portland) [33].



Las fases formadas en el cemento son: la Alita a base de C_3S ; Belita a base de C_2S ; Aluminato rica en C_3A y fase Ferrito, solución que consiste en ferritos y aluminatos de calcio [23, 67, 69].

La Alita (C_3S): Fase principal en la mayoría de los clinker portland, de ella dependen en buena parte las características de desarrollo de resistencia mecánica; el C_3S endurece más rápidamente y por tanto tiene mayor influencia en el tiempo de fraguado y en la resistencia inicial [23].

La Belita (C_2S): Segunda fase importante en el clinker, se hidrata más lentamente y su contribución al desarrollo de la resistencia empieza a sentirse después de una semana [23].

La Aluminato (C_3A): Compuesto no puro, solución sólida de C_3A con algo de impurezas de SiO_2 y de MgO . Constituye una alta resistencia inicial, pero con calor de hidratación relativamente alto: además confiere al concreto propiedades indeseables, como cambios volumétricos y resistencia pobre a los sulfatos, razón por la cual su contenido se limita entre 5 y 15% según el tipo de cemento [23].

Ferrito (C_4AF): Llamada también Brown-millerita, es solución sólida que fluctúa desde C_2F hasta C_6A_2F . Esta fase, aunque disminuye la temperatura de clinkerización, debe mantenerse en un mínimo por tratarse de un relleno [23].

1.2.3.2 La grava

La grava o también conocida como gravilla, consiste en rocas que varían en tamaños desde 5 mm hasta 50 mm para los concretos usados en edificaciones y puentes; en concretos especiales como los usados en presas de gravedad los tamaños pueden ser mayores. Requiere buena gradación, resistencia al desgaste, durabilidad, superficies libres de impurezas. El tamaño máximo está determinado por el proceso de construcción; especialmente influye la separación del refuerzo y las dimensiones del elemento que se pretende construir.

1.2.3.3 Arena

La arena o material fino, es aquel que pasa el tamiz N°4 (4.75 mm) y debe estar libre de impurezas, especialmente orgánicas.

1.2.3.4 Agua

El agua a utilizar en la mezcla no debe contener impurezas. El proceso de hidratación genera calor, que produce aumento de temperatura en la mezcla y expansión volumétrica y que debe controlarse sobre todo en vaciados masivos. Con el fin de controlar el exceso de agua en la mezcla, se adicionan plastificantes, los cuales además de facilitar el proceso constructivo, permiten obtener concretos de resistencia más uniforme.

1.2.4 Diseño de la mezcla

Para la elaboración de las probetas se tuvo en cuenta el procedimiento utilizado por Tecnoconcretos S.A. [31], el cual se basa en las normas ACI y enuncia los siguientes pasos:

- Paso 1. Selección del asentamiento: Este factor corresponde al grado de compactación que tiene el concreto desde que se humedece, hasta que termina el fraguado.
- Paso 2. Selección del tamaño máximo del agregado: El tamaño máximo del agregado deberá ser el mayor económicamente disponible y compatible con las dimensiones de la estructura.
- Paso 3. Estimación de los contenidos de agua y aire: La cantidad de agua por volumen unitario de concreto que se requiere para producir un asentamiento dado depende de la distribución de tamaño, la forma de las partículas y el tamaño máximo de los agregados así como de la cantidad de aire incluido.
- Paso 4. Determinación de la Resistencia del diseño: En la norma ACI 318-71 se encuentran las recomendaciones de diseño para la selección de resistencia de la mezcla, en función de la resistencia estructural y del coeficiente de variación, que indica el grado de control de calidad del concreto en la obra.
- Paso 5. Selección de la relación agua/cemento: Existen varios factores en el diseño de la mezcla de concreto que afectan la permeabilidad, la durabilidad y otras propiedades del concreto, ante lo cual se requiere la utilización de una relación agua/cemento adecuada y de un agregado fino bien seleccionado.
- Paso 6. Calculo del contenido de cemento: La cantidad de cemento por unidad de volumen de concreto se obtiene de las determinaciones de cantidad de agua y aire y de la relación agua/cemento, como se indica en la ecuación 1. 2:

$$C = \frac{A}{\frac{A}{C}} \quad (1.2)$$

Donde C= Contenido de cemento (Kg/m³)

A= Contenido de agua (Kg/m³)

A/C= Relación agua/cemento

- Paso 7. Estimación del contenido de agregado grueso: El volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto se obtiene mediante la ecuación 1.3.

$$b = \frac{b}{b_0} * b_0 \quad (1.3)$$

Donde: b = Volumen absoluto de agregado grueso por volumen unitario de Concreto (Kg/m³)

b/b₀ = Volumen seco y compactado de agregado grueso por volumen unitario de concreto (Kg/m³)

b₀ = Relación entre la masa unitaria seca y compactada y la densidad aparente seca del agregado grueso (Kg/m³)

- Paso 8. Estimación del contenido de agregado fino: Se determina por la diferencia entre el volumen total de la mezcla (1m³) y la suma de los volúmenes de cemento, agua y agregado grueso, mediante la ecuación 1.4:

$$F = 1000 - (V_c + V_a + V_b) \quad (1.4)$$

Donde: F= Volumen de agregado fino (L/m³)

V_c= Volumen de cemento (L/m³)

V_a= Volumen de agua (L/m³)

V_b= Volumen de agregados (L/m³)

- Paso 9. Ajuste por humedad de los agregados: El agua que va a agregarse a la mezcla de prueba debe reducirse en una cantidad igual a la humedad libre que contiene el agregado, es decir, humedad total menos absorción.

1.2.5 Concreto Reforzado

El concreto simple, sin refuerzo, es resistente a la compresión, pero débil en tensión, lo que limita su aplicabilidad como material estructural. Para resistir tensiones, se emplea refuerzo de acero, generalmente en forma de barras. El acero restringe el desarrollo de las grietas originadas por la poca resistencia a la tensión del concreto [68].

La afinidad entre el acero de refuerzo y el concreto reside no solo en su similar expansión térmica, sino también en la doble protección que el concreto brinda al acero, debido a su alta alcalinidad permite la formación de una capa de óxido estable y protectora sobre la superficie del acero, lo que impide que este continúe corroyéndose (protección química). De otra parte, la naturaleza sólida del bloque de concreto, crea una barrera física, la cual impide el acceso libre y directo de partículas y sustancias que pudieran desproteger al acero de refuerzo e iniciar su corrosión (protección física) [24].

1.2.5.1 Corrosión en concreto reforzado

El concreto contiene una gran cantidad de poros los cuales pueden estar interconectados, haciéndolo permeable a líquidos y gases, pues tanto el agua como el oxígeno pueden difundirse hacia el acero de refuerzo a través de la porosidad de la masa de concreto, facilitando la acción de iones solubles como el cloruro [24, 68], que desarrollan el proceso de corrosión.

Los factores que favorecen la corrosión son: la excesiva porosidad del concreto; el reducido espesor del recubrimiento de concreto sobre el refuerzo; la existencia de grietas en la estructura y la alta concentración de agentes corrosivos en los componentes del concreto.

Existen tres tipos de procesos de corrosión en el concreto reforzado:

- 1) Corrosión general: Ocurre cuando sucede carbonatación, el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reacciona con el CO_2 (aire) que presenta caída de pH y por tanto se inicia el proceso de corrosión.
- 2) Corrosión por esfuerzo: En estructuras sometidas a esfuerzo por tensión lo cual ocasiona fisuras.
- 3) Corrosión por picadura: Hay caída del pH en presencia de cloruros, cuyo ataque indica que la protección física ha fallado, es decir, que la barrera física no impidió que los iones llegaran a la superficie del metal.

1.2.6 Técnicas a utilizar

1.2.6.1 Difracción De Rayos X (DRX)

Es un método de análisis no destructivo que puede ser usado sobre muestras en polvo o sólidas, permitiendo el estudio en compuestos químicos y biológicos, a su vez, proporciona medidas precisas de dimensiones moleculares fundamentales en el análisis de polímeros inorgánicos. Es utilizada para la caracterización estructural del material e identificar sus fases cristalinas y confirmar si las condiciones termodinámicas y cinéticas establecidas en cada caso fueron favorables para la obtención del producto semicristalino.

➤ *Análisis cualitativo*

La DRX permite la identificación de las fases presentes en un sistema policristalino, este análisis de las fases cristalinas se realiza mediante el método de Hanawalt utilizando la base de datos cristalográfica PDF-2 de la ICDD [27]. La exactitud del análisis cualitativo por el método de Hanawalt se debe a la utilización de un pequeño rango de $\pm 0,01$ para el intervalo de los valores de d . Este método utiliza las tres líneas más intensas para el análisis cualitativo cambiándolas entre sí para minimizar el problema de las orientaciones preferidas que se pueden presentar en el análisis de la muestra.

Actualmente existen programas que permiten realizar este proceso más rápido, mediante comparación directa del perfil de difracción observado con los perfiles de los patrones de difracción obtenidos de la base de datos (PDF-2), uno de ellos es el Crystallographica Search Match (Oxford Cryosystems). Además se cuenta con las bases de datos JCPDS-ICDD, que facilita la identificación de fases por el método de polvo.

➤ *Análisis cuantitativo*

La DRX de polvo es la técnica más útil para obtener información cuantitativa de muestras policristalinas ya que las intensidades de las líneas de difracción de cada fase son proporcionales a la fracción en volumen de la fase presente en la muestra, todo esto con ayuda de un sistema computacional basado en el método de Rietveld, que consiste en ajustar un modelo teórico a un patrón experimental de DRX utilizando el sistema de mínimos cuadrados, hasta obtener el mejor ajuste entre ambos [70, 15]. El patrón de difracción calculado se basa en un modelo que incluye aspectos estructurales (grupo espacial, átomos en la unidad asimétrica, factores térmicos, etc.), microestructuras (concentración, tamaño de cristal, microdeformaciones), e instrumentales (anchura a la altura media del pico de difracción causada por el instrumento, anchura de las rejillas, tamaño de la muestra irradiada, penetración del haz de rayos X en la muestra, etc.) [28]. Los programas que desarrollan este método son Fullprof, DBWS, GSAS, Rietan y RIQAS [28].

1.2.6.2 Espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FT-IR)

Se basa en el hecho de que los enlaces químicos de las sustancias tienen frecuencias de vibración específicas, que corresponden a los niveles de energía de la molécula. Estas frecuencias dependen de la forma de la superficie de energía potencial de la molécula, la geometría molecular, las masas atómicas y al acoplamiento vibracional. Esta técnica tiene amplias aplicaciones en análisis cualitativo y cuantitativo. Usada especialmente en investigación y en la industria

como una simple y confiable práctica para realizar mediciones y control de calidad. Al medir a una frecuencia específica a lo largo del tiempo, se pueden medir cambios en el carácter o la cantidad de un enlace particular, esto es útil para medir el grado de polimerización en la manufactura de polímeros [29].

1.2.6.3 Resistencia a la compresión

Capacidad que tiene el concreto para asumir una carga por unidad de área. Generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm^2) a un tiempo de secado de 28 días, se le designa con el símbolo $f'c$ [23].

1.2.6.4 Ataque de sulfatos

Los sulfatos presentes en el suelo, al penetrar en los poros del concreto ocasionan daños en la estructura, debido a dos reacciones químicas que se efectúan dentro del concreto, la primera reacción se lleva a cabo con el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) que se libera durante la hidratación del cemento y la segunda reacción se desarrolla con los compuestos hidratados que provienen del aluminato tricálcico (C_3A) del propio cemento. Como consecuencia de la reacción de los sulfatos con el hidróxido de calcio resulta sulfato de calcio (yeso) y de la reacción con los hidratos de aluminio cálcico se produce sulfoaluminato de calcio (etringita) [22, 38]. En ambos casos, el volumen de los dos productos (yeso y etringita) representa más del doble de la suma de los volúmenes sólidos de los compuestos originales que reaccionan. De esta manera, dicho aumento de volumen que no puede acomodarse en el espacio original de los poros del concreto, genera esfuerzos internos de tensión, ocasionando microfisuras y continuando hasta desintegrarlo gradualmente.

1.2.6.5 Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)

Técnica no destructiva, que opera en corriente alterna, se basa en la aplicación de una señal de voltaje a diferentes frecuencias de oscilación, generando un flujo de corriente alterna a través de la celda electroquímica. La naturaleza de dicha celda,

produce una variación en el ángulo de fase entre la señal de voltaje y corriente, además de una variación en la magnitud de la corriente a medida que cambia la frecuencia de oscilación [24].

1.2.6.6 Resistencia a la polarización lineal (LPR)

Técnica no destructiva, que opera en corriente directa, permite obtener el valor de R_p , resistencia de polarización, la cual refleja el grado de protección que presenta la capa formada sobre la superficie del acero de refuerzo al estar embebida en concreto [24].

2 PARTE EXPERIMENTAL

2.1 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LOS ALUMINOSILICATOS

2.1.1 Análisis por difracción de rayos X

Los aluminosilicatos, ceniza volante y piedra pómez (figuras 2.1 y 2.2) se pulverizaron en un mortero de ágata hasta obtener un tamaño de partícula de 38 μm , posteriormente se realizó el montaje en un portamuestra de llenado lateral. (Figura 2.3).

Figura 2.1 Cenizas Volantes

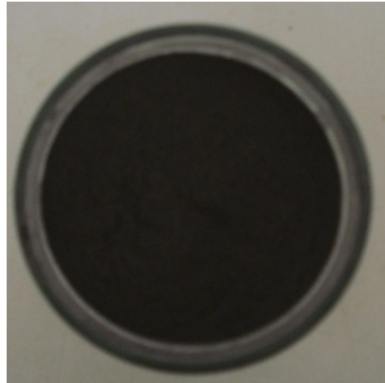


Figura 2.2 Piedra Pómez

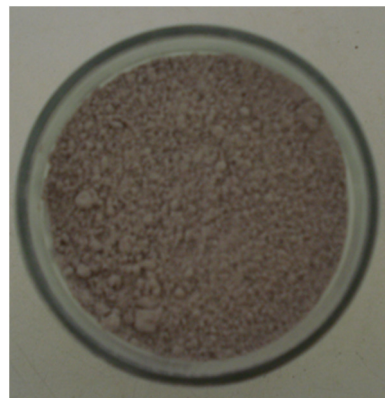
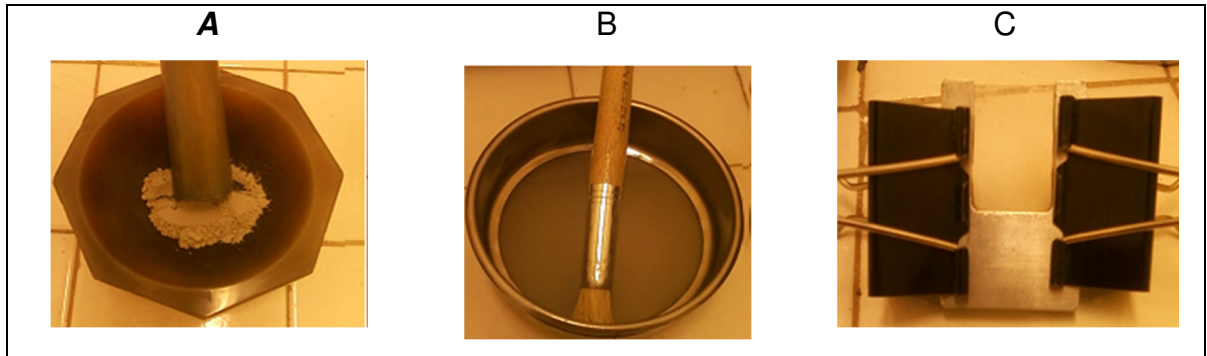


Figura 2.3 Montaje llenado lateral



*A=Mortero de ágata; B=Tamiz (38 μ m); C=Portamuestra

La toma de datos de las muestras de ceniza volante y piedra pómez se llevaron a cabo en un difractómetro marca RIGAKU modelo D/MAX IIIB, ubicado en el Laboratorio de Difracción de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander. Las condiciones de trabajo para cada muestra se describen en la tabla 2.1. La identificación de las fases cristalinas de las muestras de ceniza volante y piedra pómez se realizaron mediante la comparación de los picos obtenidos en el programa Search-Match, con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del International Center for Diffraction Data (ICDD).

Tabla 2.1 Condiciones de medida de DRX.

PARÁMETRO		DATOS	
Radiación		CuK α ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$)	
Voltaje		40 KV	
Amperaje		20 mA	
Rango de medición		2-70 $^{\circ}$ (2θ)	
Tiempo de muestreo / paso		2 s	
Intervalo de muestreo		0.02 $^{\circ}$ (2θ)	
Rendijas	DS	1 $^{\circ}$	
	RS	0.3 $^{\circ}$	
	SS	1mm	

2.1.2 Análisis por Espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FT-IR)

Las muestras de ceniza volante y piedra pómez se analizaron por medio de la técnica espectroscopia infrarroja, mediante la elaboración de pastillas con KBr, el estudio se llevó a cabo en un espectrómetro infrarrojo de transformada de Fourier marca Bruker modelo Tensor 27, el cual se encuentra instalado en la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander.

2.2 SÍNTESIS DE LOS GEOPOLÍMEROS

Una vez conocidas las fases cristalográficas de los aluminosilicatos utilizados en este trabajo (ceniza volante y piedra pómez), se procedió a realizar la síntesis de los geopolimeros, según la literatura [6]. Tanto la ceniza volante como la piedra pómez se activaron con una solución alcalina, basada en una mezcla molar de hidróxido de sodio y silicato de sodio. La temperatura empleada para la geopolimerización fue de 80°C, durante 10 horas, después de obtener una pasta viscosa, se dejó secar a temperatura ambiente durante 24 horas, hasta que esta pasta se endureciera y por último se trituró la muestra obtenida hasta un tamaño de partícula de 4,75 mm (tamiz No.4, según norma ASTM E-11-87), para realizar los análisis posteriores. Adicionalmente se varió la concentración del NaOH entre 3 M, 7,5 M y 12 M. A continuación se muestra en las figuras 2.4 y 2.5 el procedimiento utilizado para la obtención de los geopolímeros a base de ceniza volante y piedra pómez.

Figura 2.4 Procedimiento para la obtención del geopolímero a partir de la ceniza volante.

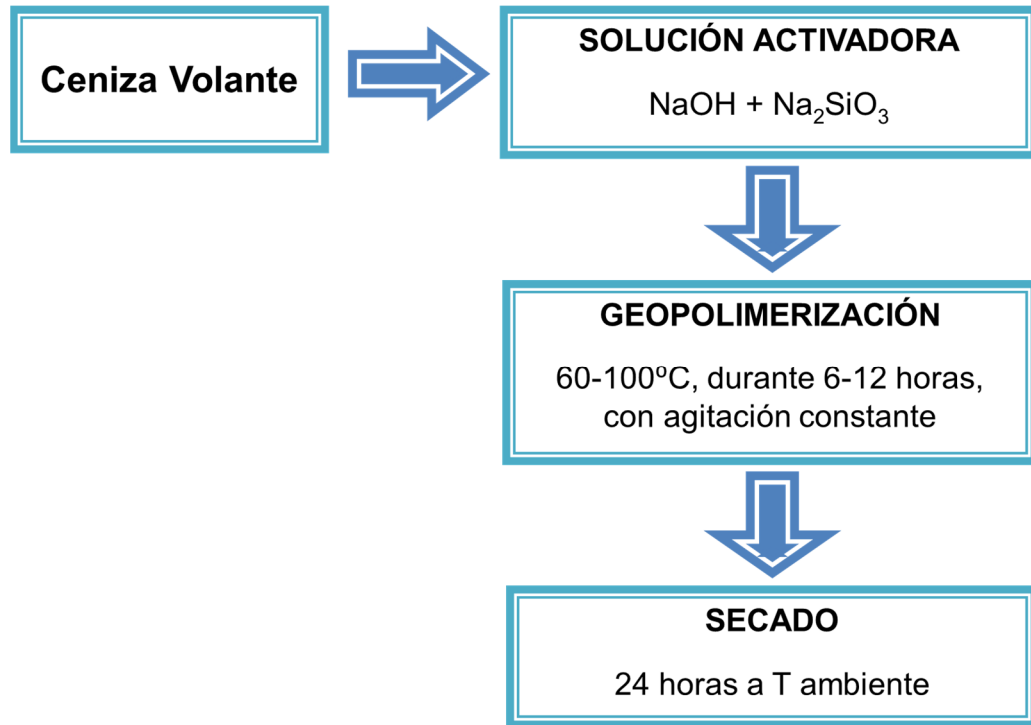
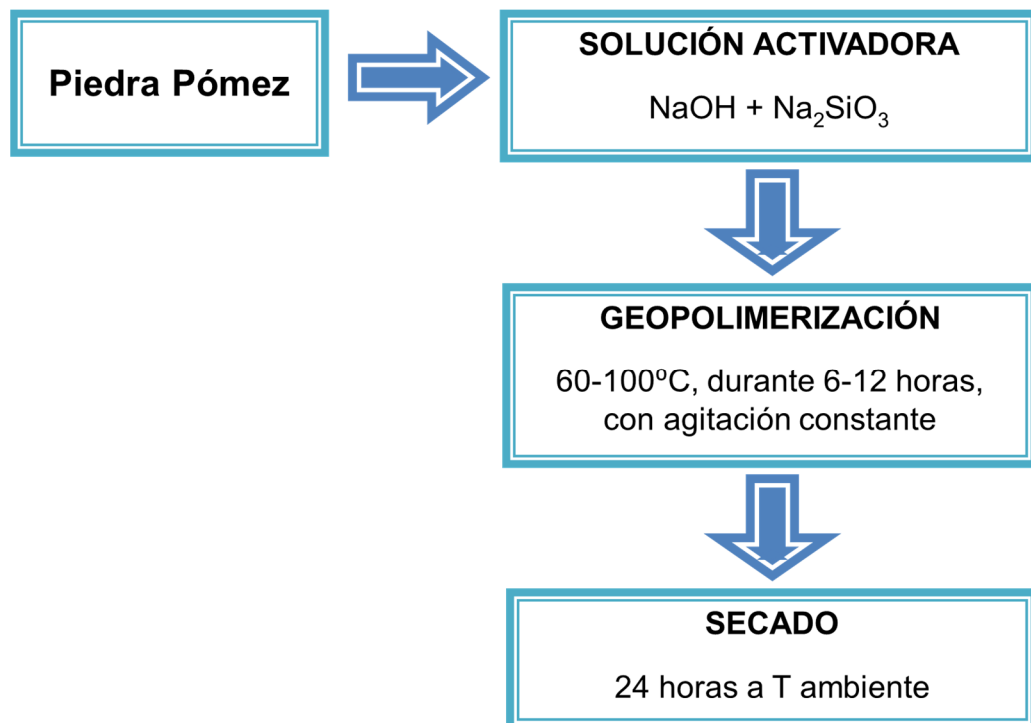


Figura 2.5 Procedimiento para la obtención del geopolímero a partir de la piedra pómez.



2.3 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LOS GEOPOLÍMEROS

2.3.1 Análisis por difracción de rayos X

2.3.1.1 Análisis cualitativo

El análisis cualitativo de los geopolímeros se realizó de la misma manera como en la sección 2.1.1.

2.3.1.2 Análisis cuantitativo

Una vez realizado el análisis cualitativo de todos los geopolímeros obtenidos, se escogieron dos geopolímeros, los cuales dieron los mejores valores de resistencia a la compresión y se llevó a cabo el análisis cuantitativo por el Método de Rietveld de la siguiente manera:

Se prepararon mezclas de cada uno de los geopolímeros y el estándar de referencia (corindón Al_2O_3) en una relación de 80:20. La mezcla fue transferida a pequeños frascos de vidrios debidamente marcados y tapados. Luego cada frasco fue golpeado contra una superficie sólida durante 10 minutos, mientras se rotaba lentamente. Este procedimiento se realizó para que los dos componentes se mezclen sin aglomeración y se favorezca la homogenización, se utilizó como montaje de las muestras el llenado lateral.

Los refinamientos para el análisis cuantitativo se efectuaron con el programa Riqas versión 5.0.7. (MDI, Rietveld Quantitative Analysis and Whole Pattern Fitting, 1999). El refinamiento se llevó a cabo en la secuencia general para cada una de las fases presentes en las muestras, hasta alcanzar la convergencia, refinando los siguientes parámetros: factores de escala, parámetros del background, constantes de celda, parámetros del ancho máximo a la altura media del pico FWHM (U, V, W) para todas las fases, intensidad de la fase amorfa y posiciones atómicas.

Como resultado del refinamiento fue posible determinar la composición para cada una de las fases presentes en los geopolímeros. Estos valores fueron dados en porcentaje en peso, además fue posible cuantificar el material amorfo presente en los materiales [30].

2.3.2 Análisis por Espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FT-IR)

El análisis por IR se realizó de la misma manera como en la 2.1.2.

2.4 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL CEMENTO

2.4.1 Análisis por difracción de rayos X

2.4.1.1 Análisis cualitativo

El cemento se pulverizó en un mortero de ágata, hasta obtener un tamaño de partícula de 38 μm , posteriormente se realizó el montaje en un portamuestra de llenado lateral. La toma de datos de la muestra de cemento se llevó a cabo en un difractómetro marca RIGAKU modelo D/MAX IIIB, ubicado en el Laboratorio de Difracción de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander.

El tratamiento de los datos se realizó de la misma manera que con los aluminosilicatos en la sección 2.1.1.

2.4.1.2 Análisis cuantitativo

Una vez realizado el análisis cualitativo del cemento, se prosiguió a realizar el análisis cuantitativo por el Método de Rietveld. Se preparó una mezcla del cemento y el estándar de referencia (corindón Al_2O_3) en una relación de 80:20. La mezcla fue transferida a un pequeño frasco de vidrio debidamente marcado y tapado. Luego el frasco fue golpeado contra una superficie sólida durante 10 minutos, mientras se rotaba lentamente. Este procedimiento se realizó para que

los dos componentes se mezclen sin aglomeración y se favorezca la homogenización, se utilizó como montaje de la muestra el llenado lateral.

El refinamiento para el análisis cuantitativo se realizó de la misma manera que con los geopolímeros en la sección 2.3.1.2.

Como resultado del refinamiento fue posible determinar la composición para cada una de las fases presentes en el cemento diamante. Estos valores fueron dados en porcentaje en peso, además fue posible cuantificar el material amorfo presente en el material [30].

2.4.2 Análisis por Espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FT-IR)

El cemento diamante se analizó por medio de la técnica de espectroscopía infrarroja, mediante la elaboración de pastillas con KBr, el estudio se llevó a cabo en un espectrómetro infrarrojo de transformada de Fourier marca Bruker modelo Tensor 27, instalado en la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander.

2.5 ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS

Las probetas utilizadas en este trabajo se prepararon a partir de los materiales que se observan en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Descripción de los materiales empleados para la elaboración de las probetas.

MATERIAL	DESCRIPCIÓN
Cemento	Pórtland tipo I. Marca CEMENTO DIAMANTE.
Agregado grueso	Piedra triturada con tamaño máximo de 19 mm, proveniente de Pescadero.

Agregado fino	Arena con tamaño máximo de 4,75 mm, proveniente de Pescadero.
Agua	Tomada del acueducto, ya que es apta para la elaboración de mezclas de concreto, según norma ICONTEC NTC 3459 [32].

A los agregados, grueso [34] y fino [35] se les determinó la densidad (2.1), mediante la medición del desplazamiento ocasionado por una cantidad determinada de material, a un volumen determinado de agua.

$$\rho = \frac{\text{peso del material (g)}}{\text{volumen desplazado (ml)}} \quad (2.1)$$

Adicionalmente a ambos agregados se les determinó el porcentaje de absorción [36], como la pérdida de peso por la cantidad de humedad evaporada al calentar a 100°C la muestra. Este procedimiento se realizó por triplicado hasta peso constante. El porcentaje de absorción se obtuvo al aplicar la ecuación 2.2.

$$\% \text{ Absorción} = \frac{(\text{peso húmedo} - \text{peso seco})}{\text{peso húmedo}} * 100 \quad (2.2)$$

2.5.1 Diseño de mezcla

En este trabajo se realizaron dos fases, en la primera fase la cantidad de agregado fino adicionado a las probetas, se sustituyó al 100% por los geopolímeros, con el fin de observar cambios en la resistencia mecánica del concreto, en este caso la concentración de la solución de NaOH empleada para la síntesis fue de 3 M; y la segunda fase consistió, en sustituir solamente el cemento en un 10, 20 y 30% con los geopolímeros, ya que la finalidad del proyecto es obtener un material que puede sustituir al cemento, en esta fase se utilizaron tres concentraciones de la solución de NaOH 3 M, 7.5 M y 12 M, para observar el

cambio que ocasiona el agente activador en los geopolimeros y a su vez en la resistencia a la compresión en el concreto. Para llevar a cabo la segunda fase, se realizó un diseño experimental con el programa STATGRAPHICS Versión 4.0, obteniéndose 16 experimentos para realizar, cuyas variables fueron la concentración de NaOH, el porcentaje de sustitución y el tiempo de curado.

Se construyeron probetas de referencia, es decir, en las que no se cambió ningún material. Los diseños de mezclas de concreto se realizaron de acuerdo a los procedimientos técnicos utilizados en Tecnoconcretos S.A [31], los cuales se ajustan al código A.C.I 318-71. En las tablas 2.3, 2.4 y 2.5, se observan los diseños utilizados en este trabajo.

Tabla 2.3 Parámetros de diseño para las probetas de referencia.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
ASENTAMIENTO	5.0-10.0 cm
TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO GRUESO	19 mm
RESISTENCIA ESTRUCTURAL DEL DISEÑO	3500 psi
CONTENIDO DE AGUA	200 kg/m ³ de concreto
RELACIÓN AGUA/CEMENTO	0.51
CONTENIDO DE CEMENTO	392 kg/m ³ de concreto
CONTENIDO DE AGREGADO GRUESO	1106 kg/m ³ de concreto
CONTENIDO DE AGREGADO FINO	675.51 kg/m ³ de concreto

Tabla 2.4 Parámetros de diseño para las probetas de la primera fase (sustitución del agregado fino).

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
ASENTAMIENTO	5.0-10.0 cm
TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO GRUESO	19 mm

RESISTENCIA ESTRUCTURAL DEL DISEÑO	3500 psi	
CONTENIDO DE AGUA	200 kg/m ³ de concreto	
RELACIÓN AGUA/CEMENTO	0.51	
CONTENIDO DE CEMENTO	392 kg/m ³ de concreto	
CONTENIDO DE AGREGADO GRUESO	1106 kg/m ³ de concreto	
CONTENIDO DE AGREGADO FINO, EN ESTE CASO DEL GEOPOLIMERO	G.C* 489* kg/m ³ de concreto	G.P** 458** kg/m ³ de concreto

*G.C: Geopolímero a base de ceniza volante, valor dado por la densidad y el porcentaje de absorción.

**G.P: Geopolímero a base de piedra pómez, valor dado por la densidad y el porcentaje de absorción, el cual es diferente al G.C.

Tabla 2.5 Parámetros de diseño para las probetas de la segunda fase (sustitución de cemento en un 10, 20 y 30%).

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN		
ASENTAMIENTO	5.0-10.0 cm		
TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO GRUESO	19 mm		
RESISTENCIA ESTRUCTURAL DEL DISEÑO	3500 psi		
CONTENIDO DE AGUA	200 kg/m ³ de concreto		
RELACIÓN AGUA/CEMENTO	0.51		
CONTENIDO DE CEMENTO:GEOPOLÍMERO* EN kg/m ³ DE CONCRETO	90:10 352.8:39.2	80:20 313.6:78.4	70:30 274.4:117.6
CONTENIDO DE AGREGADO GRUESO	1106 kg/m ³ de concreto		
CONTENIDO DE AGREGADO FINO	675.51 kg/m ³ de concreto		

*Sustitución hecha con ambos geopolimeros, es decir probetas con G.C y otras probetas con G.P.

2.5.2 Construcción de las probetas

Después de diseñar la mezcla, se prosiguió a la elaboración de las probetas cumpliendo con los parámetros descritos en la sección anterior y siguiendo con la reglamentación de la norma ICONTEC NTC 1377 [37]. Para la elaboración de las probetas se utilizaron moldes de cilindros hechos en PVC con base metálica en

acero (figura 2.6). Antes de verter la mezcla de concreto en el molde, éste fue humedecido con acpm para facilitar el desmolde de las probetas.

Figura 2.6 Cilindros empleados para la elaboración de las probetas.



La mezcla se realizó en un platón metálico (figura 2.7), homogenizando en primer lugar el agregado fino con el cemento, luego se incorporó el agregado grueso, adicionando el agua lentamente. Después de obtener una pasta homogénea, se prosigue a verter la mezcla en los moldes, compactándola con una barra de acero [37]. La mezcla se dejó en el molde durante un día a temperatura ambiente, al cabo de este tiempo, la probeta se retiró del molde.

Figura 2.7 Preparación de la mezcla.



Cada probeta posee un diámetro de 7.5 cm y una longitud de 15 cm, para un volumen de 663 cm^3 . En total se realizaron 67 probetas, de las cuales 18 fueron elaboradas para la primera fase, 44 para la segunda fase del proyecto y 5 para la prueba de sulfatos (figura 2.8).

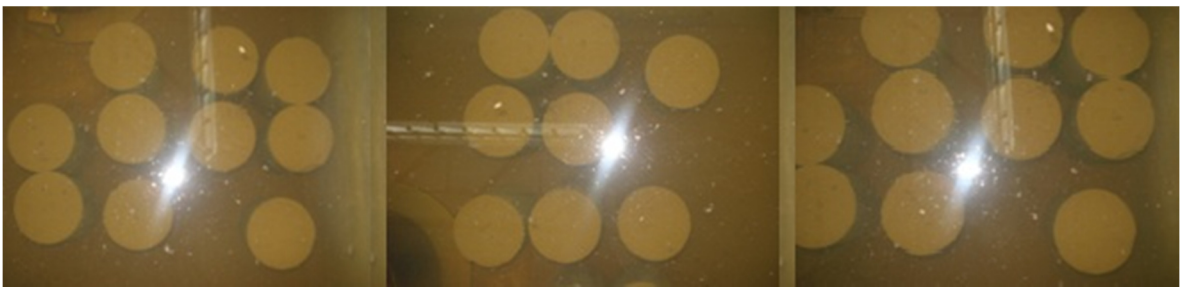
Figura 2.8 Probetas obtenidas.



2.5.3 Proceso de fraguado

Este proceso se realiza para evitar que el concreto pierda humedad con el tiempo, inicia una vez el agua hace contacto con el cemento y los agregados durante la preparación de la mezcla. El fraguado inicial se conoce como el estado de compactación primario que se realiza durante las 24 horas, después de transcurrido ese tiempo, las probetas fueron sumergidas totalmente en agua, iniciándose el fraguado normalizado, en el cual el concreto se humedece adquiriendo las propiedades de compactación necesarias para obtener alta resistencia (figura 2.9).

Figura 2.9 Probetas sumergidas en agua para el proceso de fraguado.



El fraguado para las probetas de referencia se realizó hasta los 28 días, tiempo en el cual alcanzan la mayor resistencia [37], las otras probetas en las que se utilizaron los geopolímeros se dejaron hasta los 28 días y algunas hasta 90 días

para observar algún cambio en la resistencia. El procedimiento de fraguado se realizó según la norma ICONTEC NTC 1377 [37].

2.6 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS DE CONCRETO

2.6.1 Mecánica

2.6.1.1 Resistencia a la compresión

Esta prueba fue realizada según Norma ICONTEC NTC 673 [39] por la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, en la maquina universal de ensayos INSOLTEC LTDA (figura 2.10).

Figura 2.10 Maquina universal de ensayos INSOLTEC LTDA.



Las pruebas de resistencia a la compresión para la primera fase del proyecto se realizaron a los 7, 14, 28 y 90 días de fraguado, registrando por duplicado cada medición. Para la segunda fase se realizaron mediciones para 7, 17, 28 y 90 días de fraguado.

2.6.2 Química

2.6.2.1 Resistencia a los sulfatos

Esta prueba fue realizada según Norma I.N.V E-220-07 [38], permite determinar la resistencia a la desintegración de los concretos, por la acción de soluciones saturadas de sulfato de sodio.

Se utilizaron probetas de 7.5 cm de diámetro y de longitud 15 cm, con un fraguado de 28 días. La solución de sulfato de sodio se preparó disolviendo 250 g de sal anhídrida por litro de agua.

2.6.3 Eléctrica

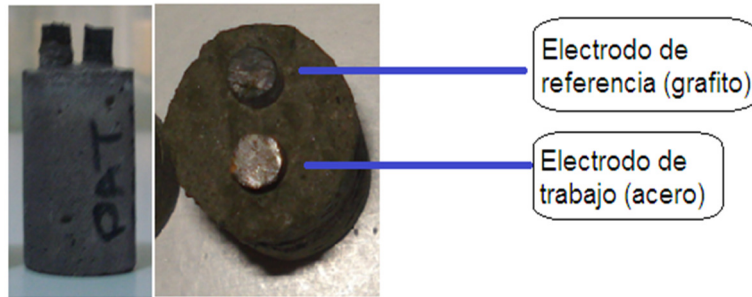
2.6.3.1 Proceso de corrosión

Para este análisis se elaboraron probetas de 2 cm de diámetro y 4 cm de longitud, cumpliendo con los parámetros establecidos en la Norma ICONTEC NTC 1377 [37], este análisis solo se aplicó para los geopolímeros que dieron mejores valores de resistencia a la compresión en la segunda fase del proyecto.

2.6.3.2 Diseño y elaboración de las celdas electroquímicas

Las celdas electroquímicas utilizadas en el proyecto corresponden a probetas de concreto armado, estas probetas se fabricaron con la misma relación observada en la tabla 2.5, pero no se utilizó agregado grueso, puesto que las probetas tenían un volumen muy pequeño, en el cual no se podía incorporar un agregado de 19 mm de diámetro, en cada probeta se introdujo un electrodo de referencia (grafito) y un electrodo de trabajo (acero) ver figura 2.11.

Figura 2.11 Probetas para el proceso de corrosión.

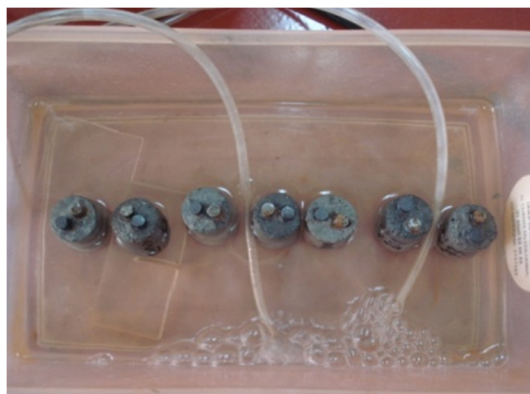


En la celda electroquímica el electrodo de trabajo actúa como acero de refuerzo de las estructuras de concreto y el electrodo de referencia permite registrar el potencial de dicho acero de refuerzo. Se elaboraron 7 probetas, la de referencia (patrón sin modificaciones), 3 con sustituciones del 10, 20 y 30% de cemento por el geopolímero a base de ceniza volante y 3 con las mismas sustituciones pero con geopolímero a base de piedra pómez.

2.6.3.3 Seguimiento del proceso de corrosión

El estudio del comportamiento electroquímico de la interfase metal-concreto se realizó mediante el seguimiento a las probetas elaboradas anteriormente, estas probetas fueron expuestas a un ambiente de corrosión, el cual consistió de sumergirlas en una solución salina de 2% de NaCl con flujo de oxígeno constante, con el fin de acelerar la corrosión (figura 2.12).

Figura 2.12 Ambiente de corrosión.



Para el seguimiento electroquímico se utilizó la técnica de espectroscopía de Impedancia (EIS) en corriente alterna y se soportó con la técnica de Resistencia a la polarización lineal (LPR) en corriente directa.

La prueba electroquímica se iniciaba cuando se alcanzaba la estabilidad del potencial de circuito abierto (EIS), previa conexión de los electrodos de la probeta de concreto al equipo correspondiente. Se realizaron 9 monitoreos correspondientes a 0, 1, 2, 4, 8, 11, 15, 31 y 44 días de exposición en el medio de corrosión.

2.6.3.4 Espectroscopía de impedancia electroquímica, EIS

Se realizó la toma de datos con la unidad de impedancia IM6 BAS-Zahner (figura 2.13), según norma ASTM G3 [40]. La señal de voltaje en corriente alterna utilizada para generar el espectro de impedancia es una onda sinusoidal de amplitud de 50 mV con un rango de frecuencia desde 200 kHz a 20 mHz.

Figura 2.13 Equipo utilizado para al análisis de corrosión.



El montaje experimental consta de: 1) medidor de impedancias, constituido por un potencióstato más un analizador de respuesta frecuencial (FRA), encargado de registrar la información de voltaje, corriente y diferencia de fase; 2) software para la visualización y análisis de pruebas electroquímicas, Thales de marca Zahner

Messtechnik; 3) celda electroquímica, probeta de concreto con el sistema de electrodos y 4) cables de conexión.

2.6.3.5 Resistencia a la Polarización Lineal, LPR.

El montaje requerido para realizar las mediciones de resistencia a la polarización lineal es el mismo que se utiliza para realizar pruebas de EIS, pero en esta técnica se trabaja con corriente directa.

3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICO DE LOS ALUMINOSILICATOS

Las fases mineralógicas de los aluminosilicatos (CENIZA VOLANTE Y PIEDRA PÓMEZ) fueron caracterizadas por la técnica de difracción de rayos X.

En las tablas 3.1 y 3.2 se muestran las fases cristalinas encontradas tanto para la ceniza volante como para la piedra pómez, con sus posiciones en $2\theta^\circ$ más intensas.

Tabla 3.1 Fases cristalinas de las cenizas volantes.

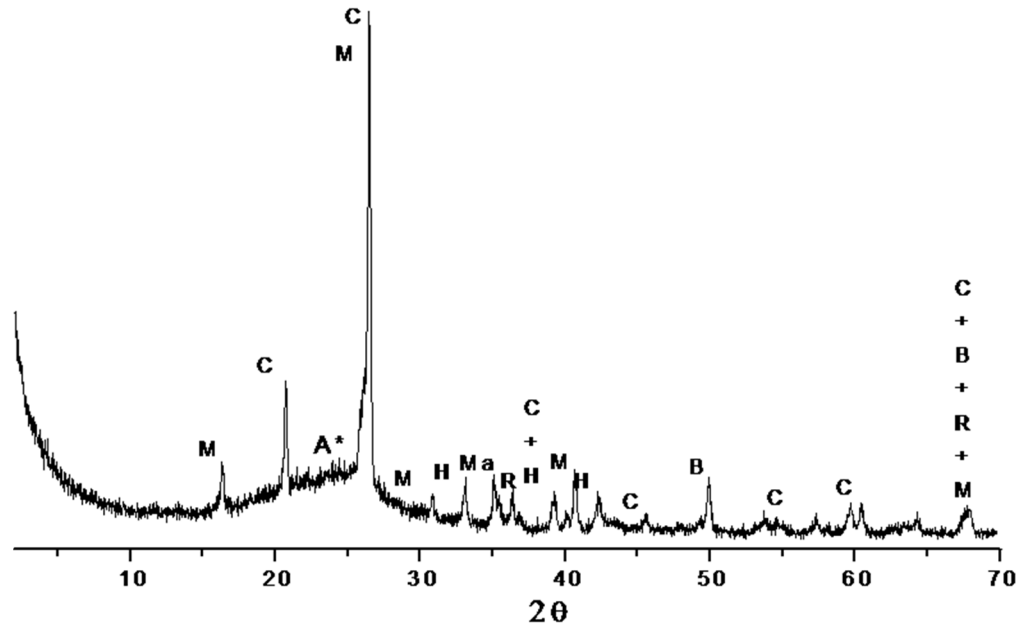
Fase	Formula	$2\theta^\circ$
<i>Cuarzo</i>	SiO_2	20,75; 26,53; 50,05 y 59,85
<i>Mullita</i>	$\text{Al}(\text{Al}_{0,83}\text{Si}_{1,08}\text{O}_{4,85})$	26,20; 16,34; 40,78
<i>Hematita</i>	Fe_2O_3	33,14
<i>Magnetita</i>	Fe_3O_4	35,52
<i>Berlinita</i>	AlPO_4	26,41
<i>Rutilo</i>	TiO_2	27,08
<i>Anatasa</i>	TiO_2	25,71

Tabla 3.2 Fases cristalinas de la piedra pómez.

Fase	Formula	2θ°
Anortita	$\text{Al}_2\text{Ca}(\text{SiO}_4)_2$	26,601; 28,055
Anortoclasa, syn	$\text{Na}_{0.71}\text{K}_{0.29}\text{AlSi}_3\text{O}_8$	22,872; 27,562; 27,814
Halita, potasio, syn	$\text{K}_{0.4}\text{Na}_{0.6}\text{Cl}$	30,245
Cuarzo alfa	SiO_2	26,601; 67,690
Wuestita, syn	$\text{Fe}_{.9712}\text{O}$	41,927
Magnetita	Fe_3O_4	35,550
Muscovita 3T	$(\text{K}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}_{3.1}\text{Al}_{0.9})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	22,872

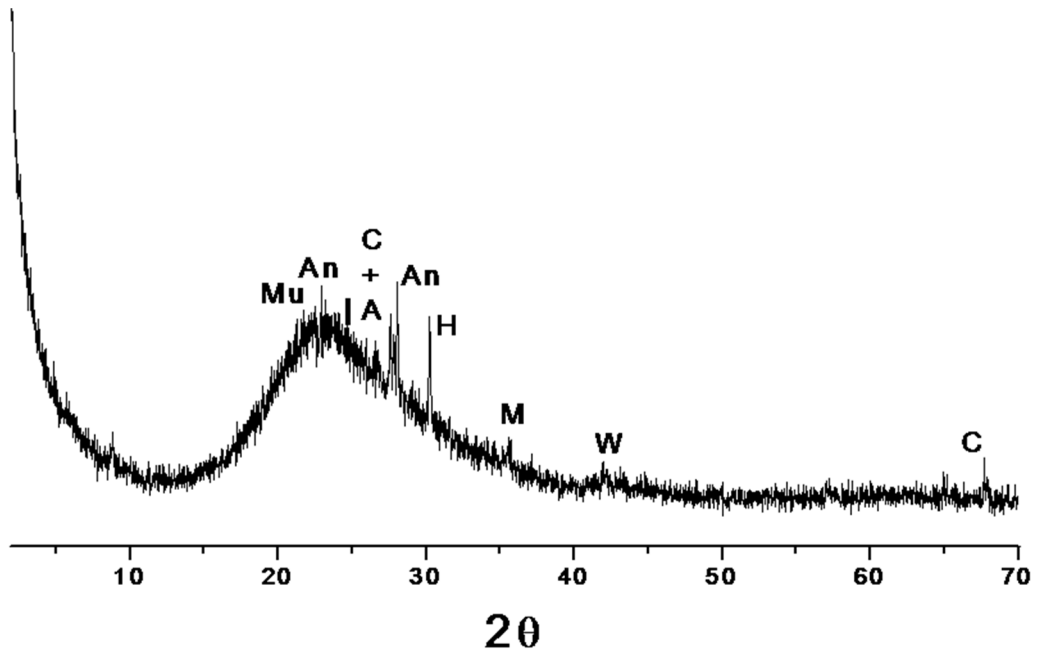
Como se observa en las figuras 3.1 y 3.2, la estructura de estos aluminosilicatos se constituye fundamentalmente por una gran cantidad de fase amorfa, causada por la ausencia de un ordenamiento cristalino en sus fases, ubicada en el rango 2θ° entre 15°-35° para la piedra pómez y entre 20°-30° para la ceniza [19]. La piedra pómez presenta mayor cantidad de fase amorfa que la ceniza, debido a que en la piedra pómez el ordenamiento de los átomos internos es menor comparado con la microestructura de la ceniza.

Figura 3.1 Patrón DRX de la ceniza volante.



C=cuarzo; M=mullita; H=hematita; Ma=magnetita; B=berlinita; R=rutilo; A*=anatasa

Figura 3.2 Patrón DRX de la piedra pómez.



A=anortita; An=anortoclase; H=halita; C=cuarzo; W=wuestita; M=magnetita; Mu=muscovita

3.2 CARACTERIZACIÓN POR ESPECTROSCOPIA INFRARROJA DE TRANSFORMADA DE FOURIER (FT-IR) DE LOS ALUMINOSILICATOS

En las figuras 3.3 y 3.4 se observa la banda característica de las vibraciones de Si-O y Al-O presentes en los aluminosilicatos, esta banda se encuentra en la región de 1080-1090 cm^{-1} para las cenizas y en 1100-1110 cm^{-1} para la piedra pómez. La banda de muy baja intensidad en la región de 1600-1660 cm^{-1} , observadas en los espectros corresponde a óxidos de minerales presentes en pequeñas proporciones en la ceniza volante y en la piedra pómez, la banda ancha de 2500 hasta 3700 cm^{-1} aproximadamente, indica la presencia de agua en ambos minerales [4,6]. El amplio espesor de las bandas se debe principalmente a la naturaleza amorfa de los aluminosilicatos, comprobándose de esta manera lo observado en los patrones de DRX.

Figura 3.3 Espectro infrarrojo de las cenizas.

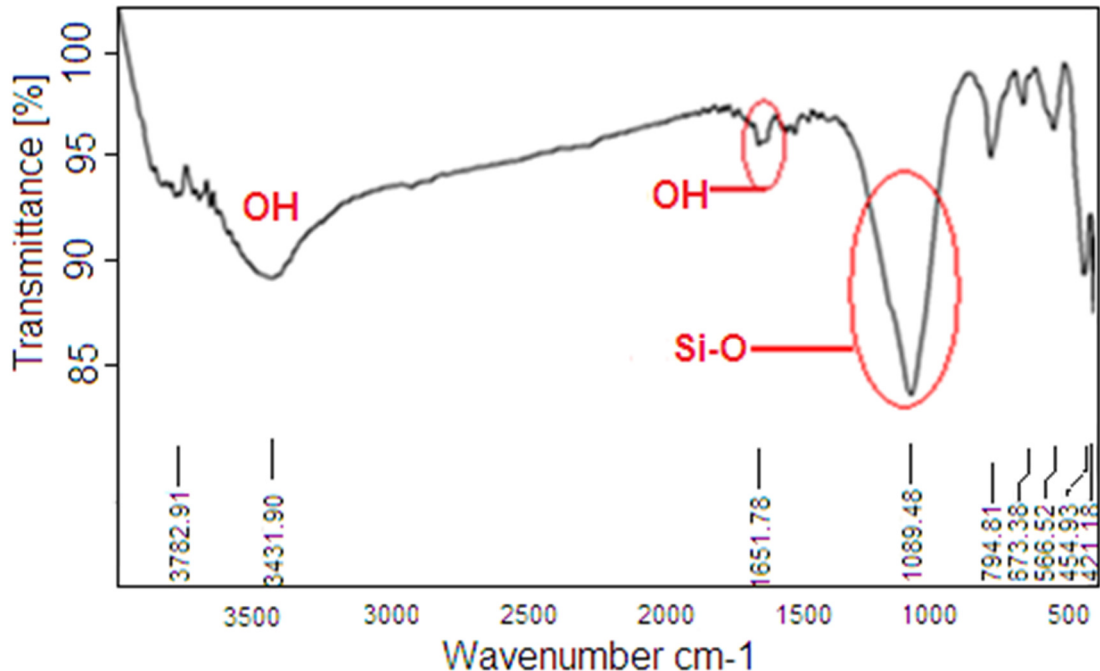
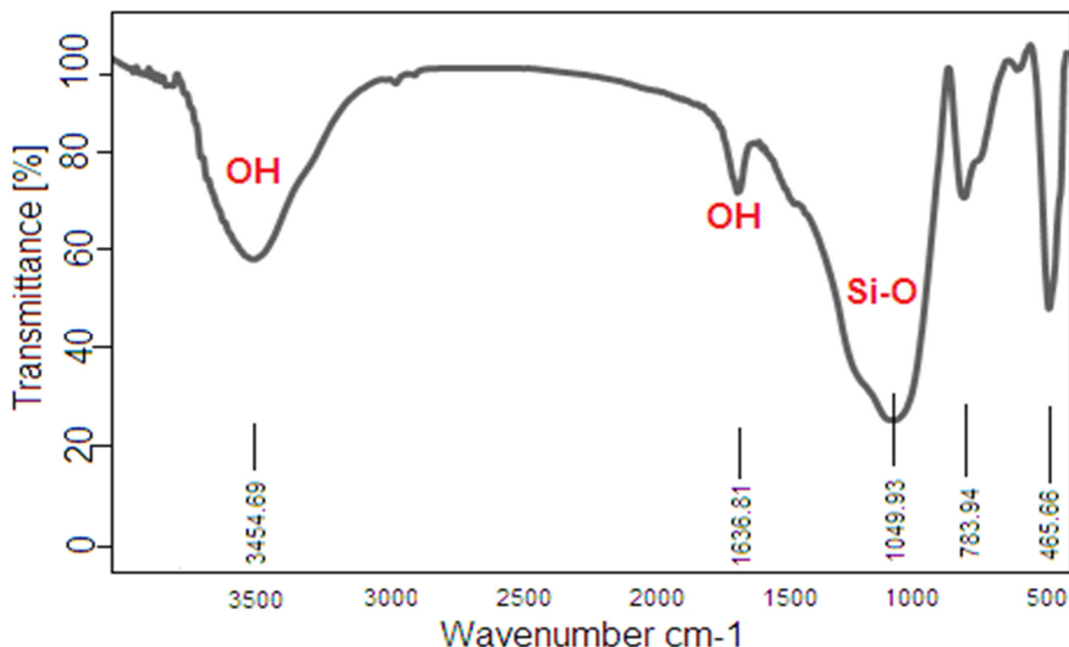


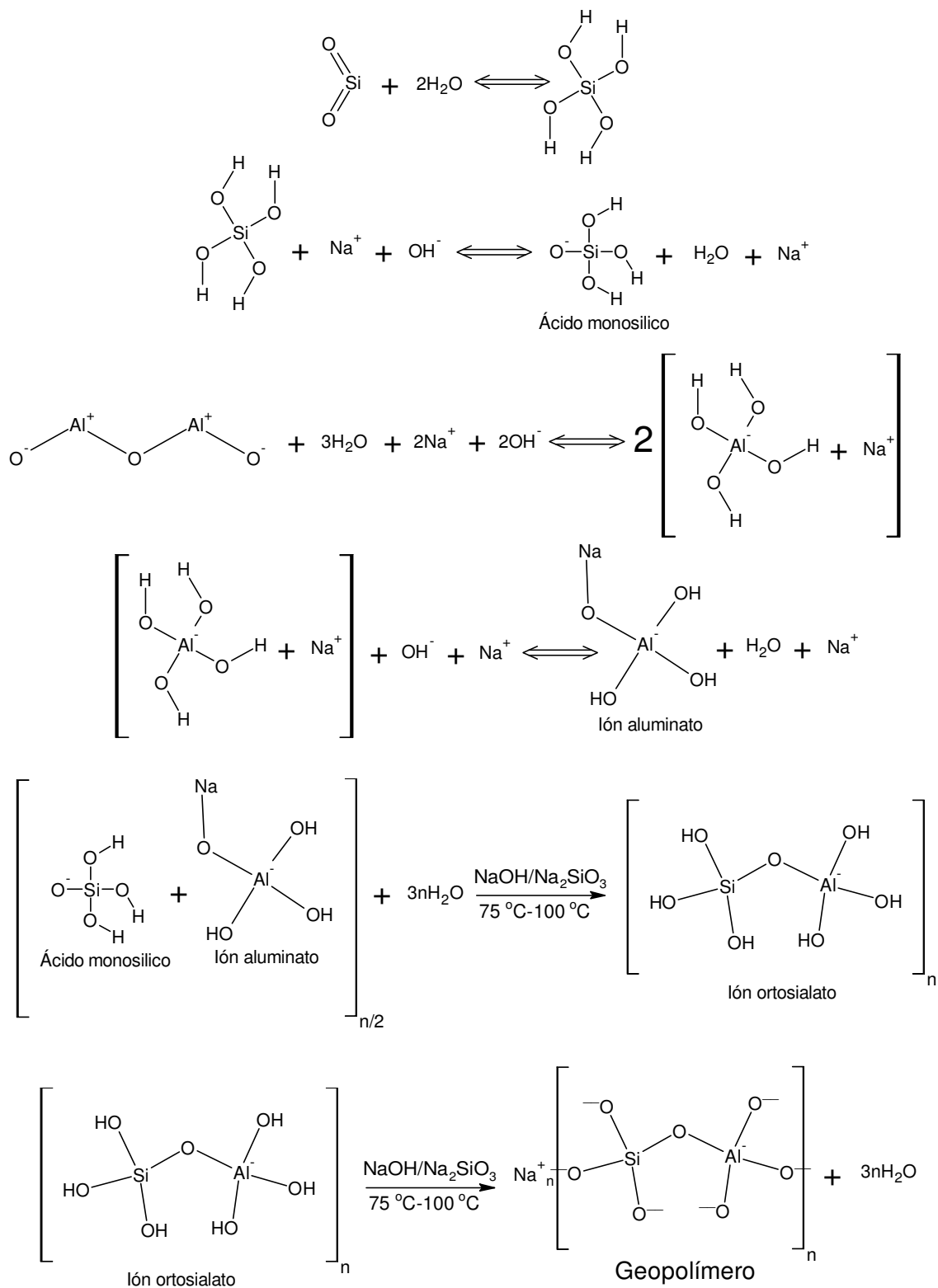
Figura 3.4 Espectro infrarrojo de la piedra pómez.



3.3 SÍNTESIS DE LOS GEOPOLÍMEROS

La síntesis de los geopolímeros GP y GC, se llevó a cabo satisfactoriamente como se describió en la parte experimental. En la figura 3.5 se muestra el mecanismo propuesto para la obtención de los geopolímeros. La ceniza volante y la piedra pómez son aluminosilicatos insolubles en agua, por lo que la primera etapa de la reacción es la disolución de estos aluminosilicatos en la solución de NaOH, formándose el ión aluminato y el ácido monosílico, estas especies se coordinan tetraédricamente debido a las condiciones altamente alcalinas, formándose el ión ortosialato, encargado de que ocurra la policondensación. La síntesis se lleva a cabo a través de oligómeros, los cuales proporcionan la unidad estructural de la red polimérica. La carga del ión ortosialato se estabiliza con la presencia del catión sodio, y como resultado de esta síntesis se obtienen el geopolímero y moléculas de agua.

Figura 3.5 Mecanismo propuesto para la obtención de los geopolímeros GC y GP.



3.4 CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LOS GEOPOLÍMEROS

3.4.1 Análisis por difracción de Rayos x

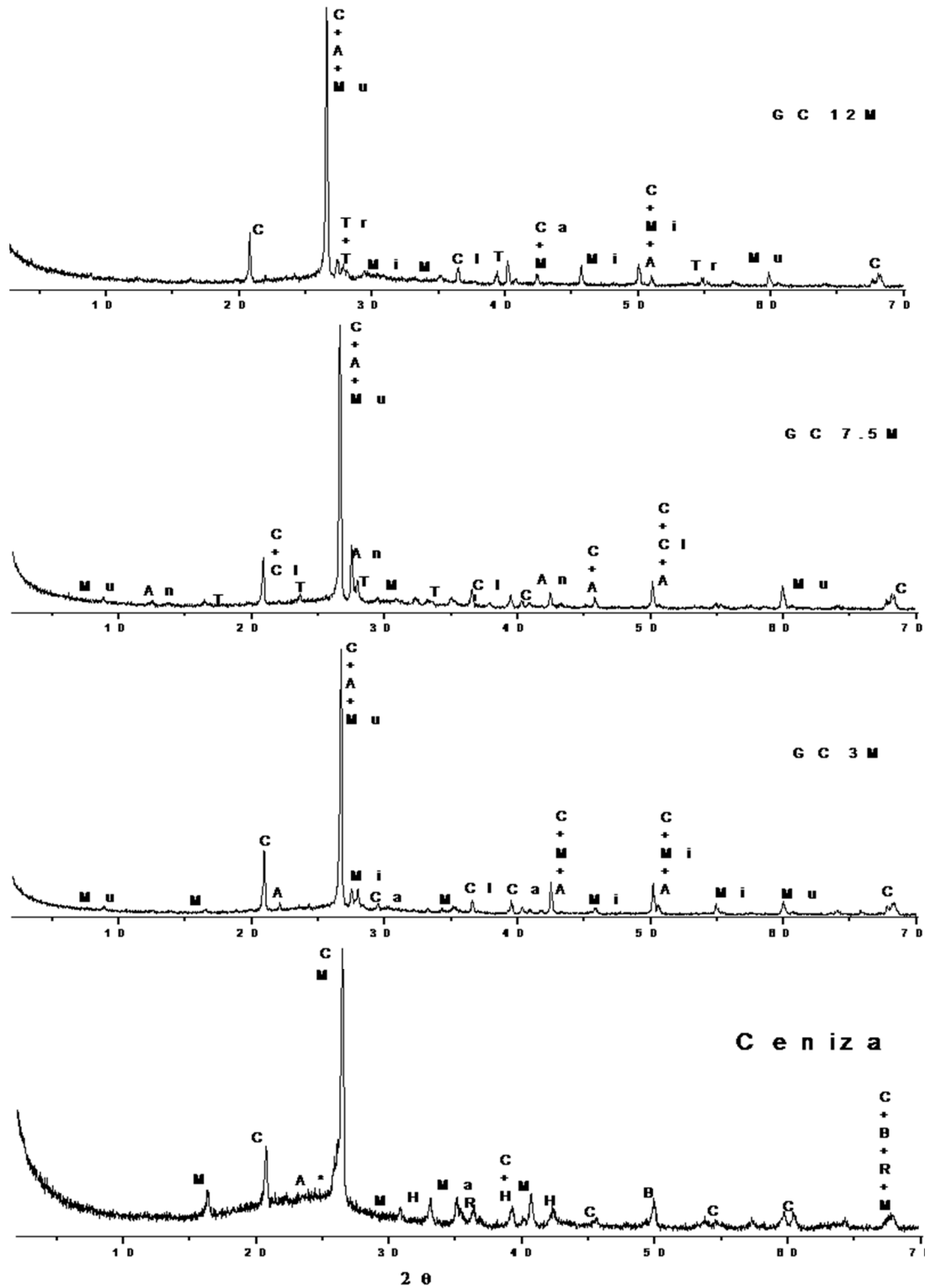
3.4.1.1 Análisis cualitativo

- **GC**

En la figura 3.6 se muestran los patrones de DRX obtenidos para el geopolímero a base de ceniza, utilizando diferentes concentraciones de la solución de NaOH (3 M, 7.5 M y 12 M). Se identificó en la microestructura de estos materiales la fase amorfa presente en la ceniza volante, pero con menor intensidad, sufriendo un corrimiento de 0.5° en el eje de 2θ . En los tres difractogramas de los geopolímeros a base de ceniza volante, se observa la formación de nuevas fases cristalográficas que no están presentes en la ceniza, estas fases resultan de la disolución de la estructura del aluminosilicato con la solución alcalina. Los iones resultantes de la reacción forman fases como: termonitrita, albita, calcita, muscovita, clinocloro, microclina, trona y anortoclasa, que consisten en general de aluminosilicatos de sodio, potasio, magnesio y aluminio, con excepción a la trona, calcita y temonatríta que consisten de carbonatos, formados principalmente de la reacción de los iones alcalinos de la red geopolimérica con el CO_2 presente en el medio ambiente. En estos materiales se conservan dos fases cristalográficas de la ceniza, el cuarzo y la mullite, las reflexiones características de estas fases sufren corrimientos del orden de 0.09° de 2θ .

Las fases nombradas anteriormente se encuentran en los tres GC, excepto la trona, que únicamente se encuentra en el GC 12 M, debido principalmente a que este geopolímero se obtiene con exceso de sodio; en el GC 7.5 M y GC 3 M se presenta la anortoclasa, la cual no está presente en el GC 12 M, lo que indica que a mayor concentración de NaOH se presentan más fases carbonatadas, es decir que ha 12 M se ha logrado el mayor grado de geopolimerización.

Figura 3.6 Difractogramas de los GC.



C=cuarzo; M=mullita; H=hematita; Ma=magnetita; B=berlinita; R=rutilo; A*=anatasa; A=albita; Ci=clinocloro; Ca=calcita; Mu=muscovita; Mi=microclina; T=termonatrita; An=anortoclasa; Tr=trona

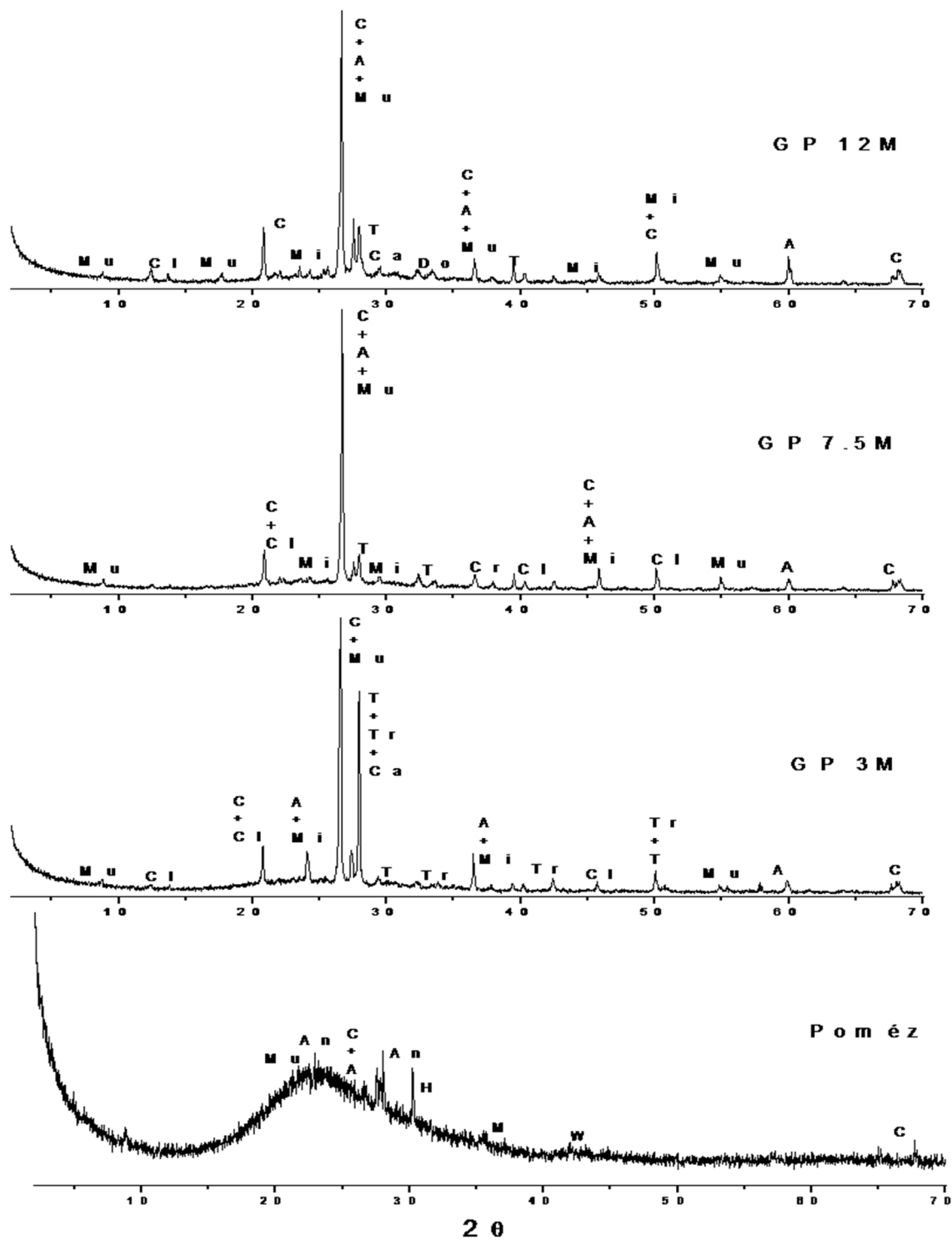
- **GP**

En la figura 3.7 se muestran los patrones de DRX obtenidos para el geopolímero a base de piedra pómez, utilizando diferentes concentraciones de la solución de NaOH (3 M, 7.5 M y 12 M). Se identificó en la microestructura de estos geopolímeros, la fase amorfa presente en la piedra pómez, pero con menor ensanchamiento e intensidad.

En los tres difractogramas de los geopolímeros a base de piedra pómez, se observa la formación de nuevas fases cristalográficas que no están presentes en la pómez, estas fases resultan de la disolución de la estructura del aluminosilicato con la solución alcalina. Los iones resultantes de la reacción forman fases como: termonitrita, calcita, clinocloro, microclina, albita, cristobalita, dolomita y trona, que consisten en general de aluminosilicatos de sodio, potasio, magnesio y aluminio, con excepción a la trona, calcita, dolomita y temonatrira que consisten de carbonatos, formados principalmente de la reacción de los iones alcalinos de la red geopolimérica con el CO₂ presente en el medio ambiente. En estos materiales se conservan dos fases cristalográficas de la piedra pómez, el cuarzo y la muscovita, las reflexiones características de estas fases sufren corrimientos del orden de 0.08° de 2θ.

Las fases nombradas anteriormente se encuentran en los tres GP, excepto la trona, que únicamente se encuentra en el GP 3 M; en los GP 7.5 M y GP 12 M se presenta clinocloro, que no se encuentra en el GP 3 M, lo que indica que todo el SiO₂ y Al₂O₃ presentes en la piedra pómez se activan a menor concentración de NaOH, es decir que ha 3 M se ha logrado el mayor grado de geopolimerización.

Figura 3.7 Difractogramas de los GP.



A*=anortita; An=anortoclasa; H=halita; C=cuarzo; W=wuestita; M=magnetita; Mu=moscovita;
 Tr=trona; T=termonatrita; Ca=calcita; Cl=clinocloro; Mi=microclina; A=albita; Cr=crystalita;
 Do=dolomita

Los desplazamientos observados tanto en los difractogramas del GC como del GP tras la activación alcalina y posterior geopolimerización, se deben principalmente a los cationes alcalinos que promueven la disolución y posterior destrucción de la estructura del aluminosilicato [21] para dar lugar al gel aluminosilicato de sodio.

3.4.1.2 Análisis cuantitativo

El análisis cuantitativo se llevó a cabo en los geopolímeros que presentaron mayor grado de geopolimerización, el GC 12 M y el GP 3 M, con el fin de determinar la cantidad numérica de cada una de las fases y expresar simultáneamente características particulares como: sistema cristalino, grupo espacial y constantes de celda, para esto se utilizó la base de datos PDF-2 del International Centre for Diffraction Data (ICDD) [30].

- **GC 12 M**

En la tabla 3.3 y figura 3.8 se muestran los resultados obtenidos durante el refinamiento del GC 12 M, por el método de Rietveld, se variaron un total de 103 parámetros como: factores de escala, constantes de celda (a, b, c), parámetros del ruido de fondo y parámetros de resolución del ancho medio (U, V, W). Los valores residuales obtenidos en el refinamiento de las fases cristalográficas fueron: $R_{WP}=17,75\%$ y $R_P=13,55\%$, los cuales reflejan que la calidad de los datos obtenidos en la medición del patrón son buenos, R_B se encuentra entre 5,28%-12%, lo que señala que los modelos escogidos son acertados en cuanto a grupo espacial, parámetros de red y posición de los átomos. Por otra parte, la bondad del ajuste (goodness of fit) obtenido después del refinamiento es de 1,80, lo que indica una buena confiabilidad del ajuste [71].

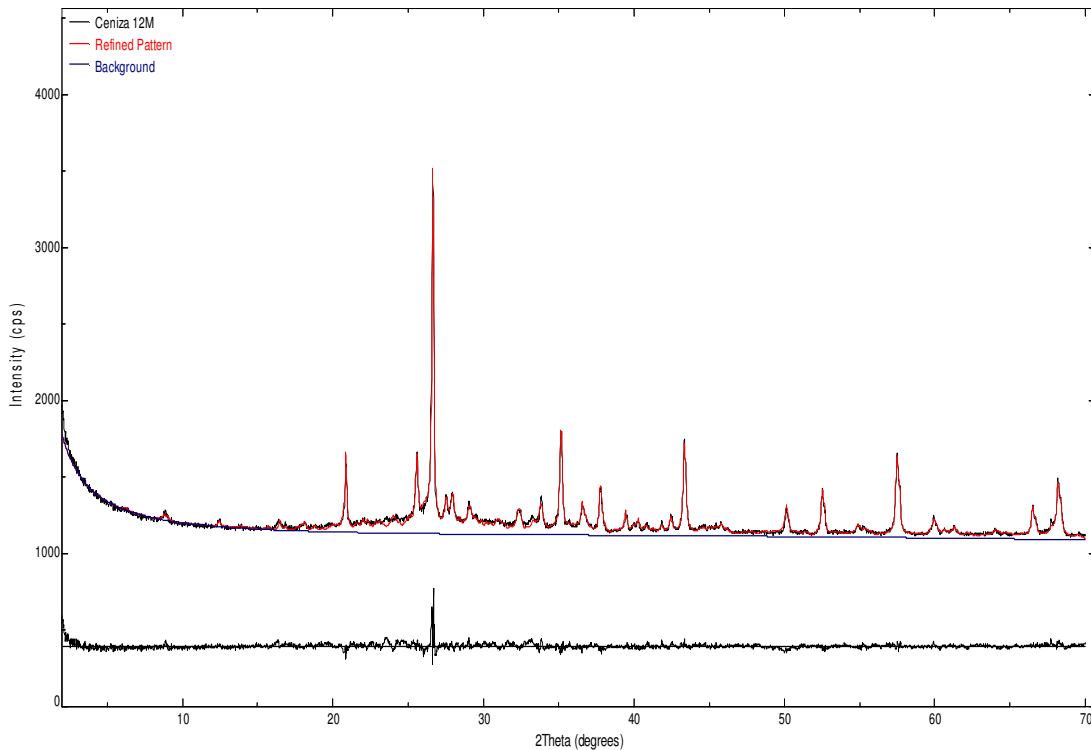
Tabla 3.3 Resultados del refinamiento del GC 12M.

GC 12 M									
Fases*	Cu	Tr	Al	Mi	Mus	Te	Mu	Cli	Cal
ICSD**	90145	35191	90142	35335	26818	34886	66448	74009	18166
Variables Refinadas	103								
a (Å)	4,9105(2)	20,419(4)	8,142(1)	8,705(1)	5,1682(7)	6,479(1)	7,571(2)	5,304(2)	5,002(1)
b (Å)	4,9105(2)	3,4928(6)	12,879(2)	13,004(2)	5,1682(7)	10,730(3)	7,639(2)	9,435(4)	5,002(1)
c (Å)	5,4024(4)	10,331(2)	7,2115(9)	7,314(1)	30,146(9)	5,255(1)	2,9035(6)	14,310(4)	16,976(7)
α (°)	90	90	94,56(1)	94,01(2)	90	90	90	90,92(4)	90
β (°)	90	106,52(2)	117,68(1)	117,77(2)	90	90	90	97,42(4)	90
γ (°)	120	90	87,62(1)	84,12(2)	120	90	90	90,00(6)	120
V (Å³)	112,816	706,365	667,424	728,544	697,298	365,380	167,953	710,231	367,903
ρ (g/cm³)	2,653	2,125	2,613	2,537	2,850	2,254	3,137	2,644	2,710
FWHM	U	0,7181	0	0	0	0	0	0	0
	V	0,2958	0,2729	0	0	0	0	0	0
	W	0,0427	0,0065	0,0339	0,0415	0,0592	0,0353	0,0266	0,0384
R_B (%)	5,99	5,28	8,55	10,44	7,92	10,40	12	11,73	8,74
R_P (%)	13,55								
R_{WP} (%)	17,75								
Bondad del Ajuste	1,80								
% DRX (cuantitativo)	24,4	13,4	8,6	8,2	4,4	4,3	3,8	2,5	1,0
% Amorfo	29,5								

*Fases: Cu= Cuarzo; Tr= Trona; Al= Albita; Mi= Microclina; Mus= Muscovita; Te= Termonatrita; Mu= Mullita; Cli= Clinoclore; Cal= Calcita,

**ICSD: Inorganic Crystal Structure Database

Figura 3.8 Difractograma refinado del GC 12 M.



- **GP 3 M**

En la tabla 3.4 y figura 3.9 se muestran los resultados obtenidos durante el refinamiento del GP 3 M por el método de Rietveld, se variaron un total de 81 parámetros como: factores de escala, constantes de celda (a, b, c), parámetros del ruido de fondo y parámetros de resolución del ancho medio (U, V, W). Los valores residuales obtenidos en el refinamiento de las fases cristalográficas fueron: $R_{WP}=21,66\%$ y $R_P=16,51\%$, los cuales reflejan la buena calidad de los datos obtenidos en la medición del patrón, R_B se encuentra entre $8,59\%-18,95\%$, lo que señala que los modelos escogidos son acertados en cuanto a grupo espacial, parámetros de red y posición de los átomos. Por otra parte, la bondad del ajuste (goodness of fit) obtenido después del refinamiento es de 1,98, lo que indica una buena confiabilidad del ajuste [71].

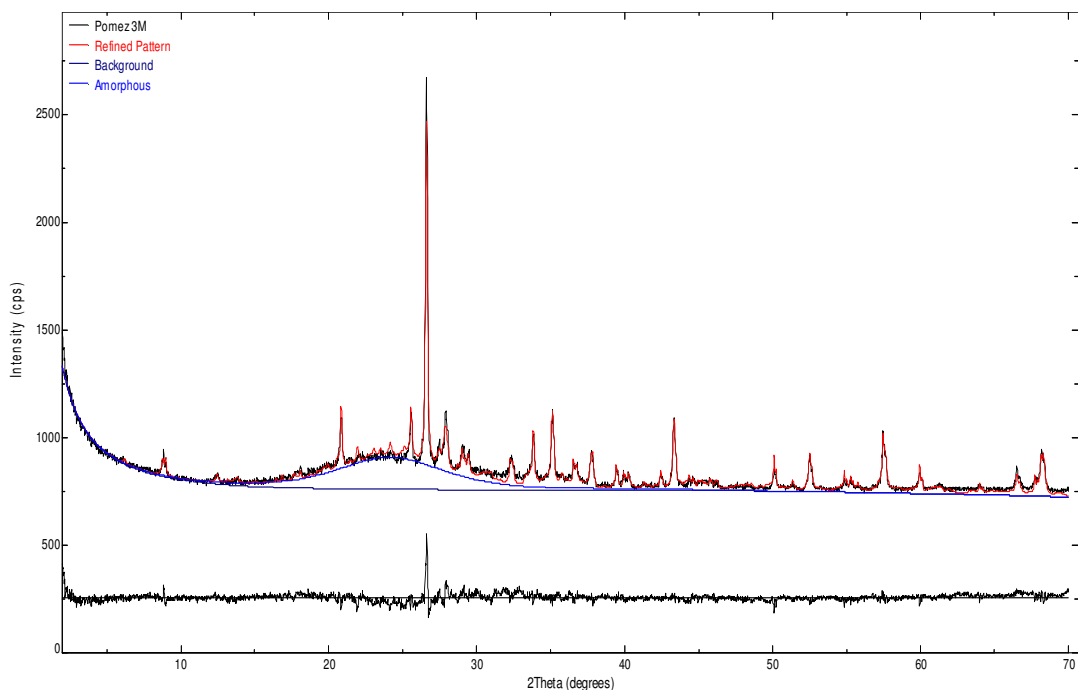
Tabla 3.4 Resultados del refinamiento del GP 3M.

GP 3 M									
Fases*	Cu	Tr	Mi	Al	Te	Mus	Cli	Cal	
ICSD**	90145	35191	35335	34657	34886	26818	66258	18166	
Variables Refinadas	81								
a (Å)	4,91212(9)	20,411(1)	8,563(2)	8,179(1)	6,4685(7)	5,1877(6)	5,388(2)	4,9751(7)	
b (Å)	4,91212(9)	3,4897(3)	13,026(2)	12,796(3)	10,744(1)	5,1877(6)	9,380(5)	4,9751(7)	
c (Å)	5,4078(3)	10,3266(9)	7,316(1)	7,151(1)	5,2501(6)	30,049(7)	14,225(6)	17,064(4)	
α (°)	90	90	91,36(2)	95,04(3)	90	90	90	90	
β (°)	90	106,435(8)	117,68(2)	116,39(1)	90	90	95,51(6)	90	
γ (°)	120	90	86,78(2)	87,70(3)	90	120	90	120	
V (Å ³)	113,005	705,528	721,715	667,884	364,907	700,380	715,633	365,774	
ρ (g/cm ³)	2,649	2,128	2,561	2,607	2,257	2,837	2,820	2,726	
FWHM	U	0	0	0	0	0	0	0	0
	V	0	0	0	0	0	0	0	0
	W	0,0099	0,0112	0,0326	0,0269	0,0116	0,0369	0,0376	0,0276
R _B (%)	8,59	13,86	13,95	18,95	14,78	11,23	14,03	15,45	
R _P (%)	16,51								
R _{WP} (%)	21,66								
Bondad del Ajuste	1,98								
% DRX (cuantitativo)	16,2	14,4	9,9	8,7	7,5	6,7	2,8	2,4	
% Amorfo	31,2								

*Fases: Cu= Cuarzo; Tr= Trona; Mi= Microclina; Al= Albita low; Te= Termonatrita; Mus= Muscovita; Cli= Clinoclore IIb-2; Cal= Calcita,

**ICSD: Inorganic Crystal Structure Database

Figura 3.9 Difractograma refinado del GP 3 M.



3.4.2 Caracterización por espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FT-IR) de los geopolímeros

El análisis por IR de los geopolímeros obtenidos evidencia la presencia del agregado inorgánico. La banda característica de las vibraciones producidas por los óxidos de Si y de Al, se ha desplazado a valores más bajos ($1030-1018\text{ cm}^{-1}$) para ambos geopolímeros, con una variación en su intensidad. Este comportamiento se debe a la transformación que sufre el precursor aluminosilicato ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) a ión ortosialato, por la presencia del agente alcalino, el cual activa los enlaces de los óxidos, formando las dos especies, el ión aluminato ($\text{Al}(\text{OH})_4^-$) y el ácido monosilico ($\text{OSi}(\text{OH})_3^-$), encargados de formar el monómero ($n(\text{OH})_3\text{-Si-O-Al-(OH)}_3$) intermediario de la policondensación. Las bandas ubicadas entre 600 cm^{-1} y 800 cm^{-1} se relacionan a las vibraciones de tensión del enlace Al-O, las bandas ubicadas entre 400 y 600 cm^{-1} se asocian a vibraciones por deformación del enlace Si-O-Si y Al-O-Si. El pico ubicado en 1641 cm^{-1} para los GP y en 1638 cm^{-1} para los GC, corresponde a la vibración por deformación del

enlace H-OH, ya que el alto contenido de álcalis en la red polimérica disminuye el tamaño del poro, evitando de esta manera la evaporación del agua [14]. La mayor intensidad de la banda se asocia al mayor número de moléculas de agua presentes en el GC 12 M y en el GP 3 M, debido a que en estos geopolímeros se logra el mayor grado de geopolimerización. La banda ancha y muy intensa en 3452 cm^{-1} para los GP y en 3453 cm^{-1} para los GC, resulta de las vibraciones de tensión del grupo enlazante -OH del agua presente en forma molecular libre o adsorbida en la superficie o poros del geopolímero. La banda que se encuentran en la región de $1025\text{-}800\text{ cm}^{-1}$ aproximadamente se deben a las vibraciones de flexión del enlace Si-O provenientes del silicato de sodio, esta banda se centra en 1029 cm^{-1} para los GP y en 1025 cm^{-1} para los GC. La banda en 1410 cm^{-1} para los GP y en 1404 cm^{-1} para los GC se atribuyen a vibraciones de tensión del C-O de carbonatos presentes en los geopolímeros, la presencia de carbonatos se debe a la interacción del material con el CO_2 del medio ambiente, en este caso para formar carbonatos de sodio, comprobándose de esta manera la presencia de las fases, la trona y temonatríta. El amplio espesor de las bandas detectadas se atribuye principalmente a la naturaleza amorfa de los geopolímeros, las bandas son más anchas en los GP debido a que presentan mayor porcentaje de amorfo que los GC (Anexos K y L).

3.5 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS DE CONCRETO

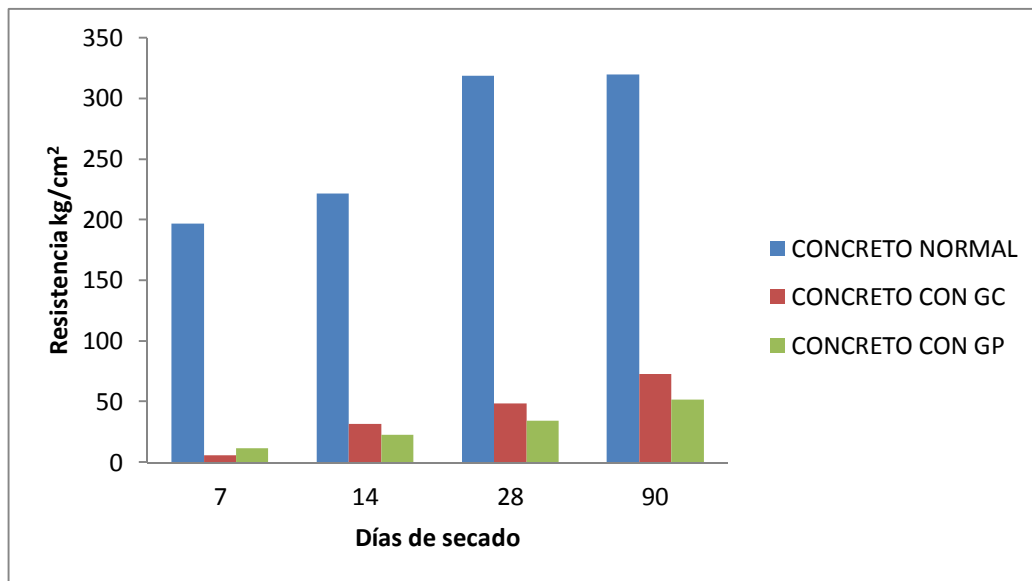
3.5.1 Análisis mecánico (Resistencia a la compresión)

- **Fase 1**

En la figura 3.10 se muestran los valores de resistencia a la compresión [$f'_c(\text{kg}/\text{cm}^2)$], obtenidos para los concretos fabricados en la primera fase, con cemento Portland (OPC), GC y GP, los días de secado fueron de 7, 14, 28 y 90 días (Norma ICONTEC 673). Se observó que efectivamente los geopolímeros afectan la matriz del concreto, generando un gradiente de resistencia mayor que el

concreto de referencia. En los resultados mostrados se debe tener en cuenta que la resistencia fue pequeña, debido a que los geopolímeros sintetizados sustituyeron al 100% el agregado fino (arena), el cual es una de las materias primas del concreto, que a su vez le proporciona la resistencia junto con el agregado grueso [23].

Figura 3.10 Resistencia de los concretos OPC, GC y GP.



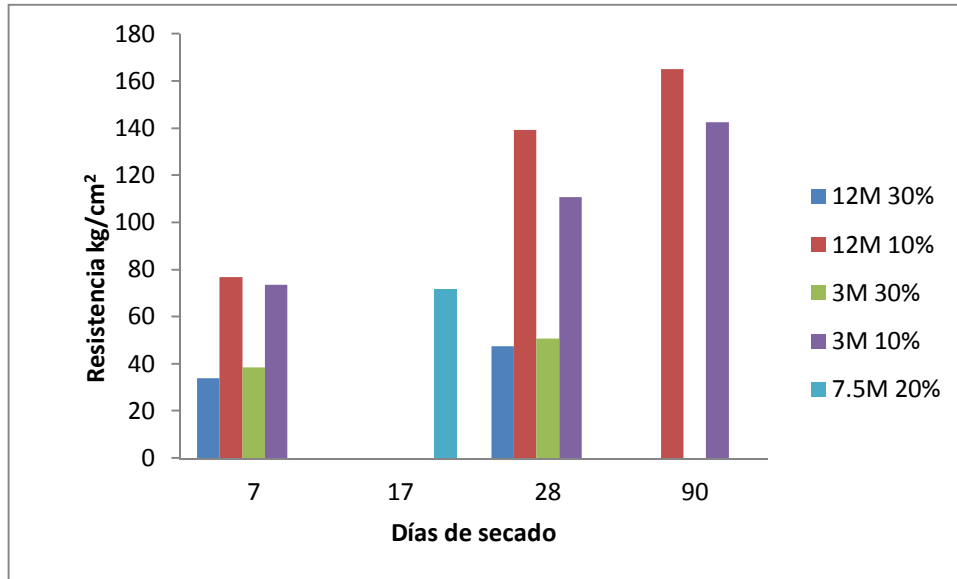
Los concretos muestran un aumento en la resistencia con el transcurso del tiempo de secado, el concreto con OPC tiene su máxima resistencia a los 28 días de secado, en cambio los concretos fabricados con los geopolímeros siguen aumentando con los días. Se observa que el concreto con GC a los 7 días muestra una resistencia menor que el de GP, pero a los 14 días su resistencia aumenta considerablemente a comparación con el concreto de GP.

- **Fase 2**

En las figuras 3.11 y 3.12 se muestran los valores de resistencia a la compresión [$f'c$ (kg/cm²)] obtenidos para los concretos fabricados en la segunda fase, con GC y con GP, los días de secado fueron de 7, 17, 28 y 90 días (Norma ICONTEC 673).

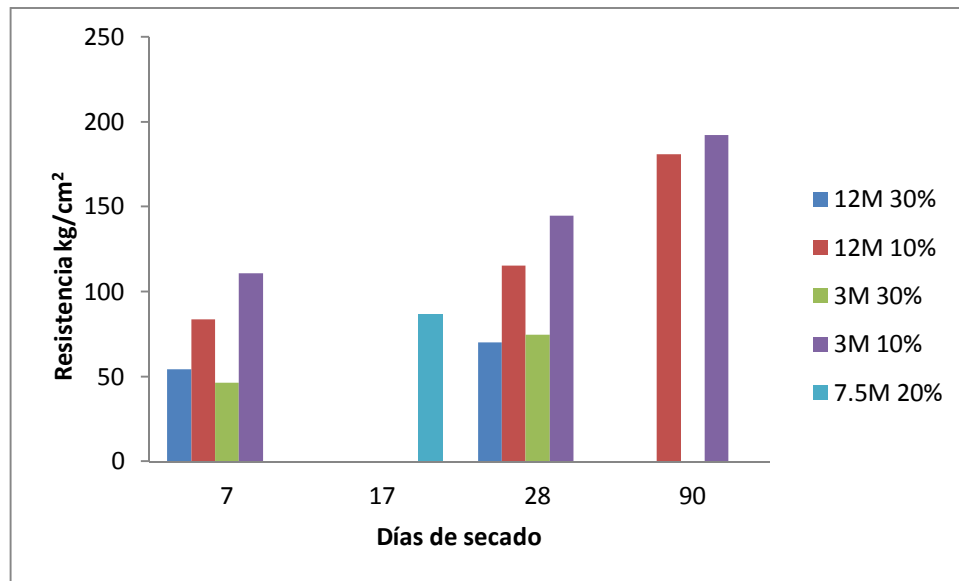
En los resultados mostrados se debe tener en cuenta que los geopolimeros sintetizados sustituyeron el 10, 20 y el 30% del cemento, mostrando valores altos cuando se sustituye el 10% del cemento con un tiempo de fraguado de 28 días.

Figura 3.11 Resistencia del concreto GC.



Los valores más altos de resistencia se observan en el geopolimero GC de mayor grado de geopolimerización a 12 M, como se discutió anteriormente.

Figura 3.12 Resistencia del concreto GP.



Los valores más altos de resistencia se observan en el geopolimero GP de mayor grado de geopolimerización a 3 M, como se discutió anteriormente.

Los concretos muestran un aumento en la resistencia a medida que se incrementa el tiempo de secado; el concreto normal, tiene su máxima resistencia a los 28 días de secado, en cambio los concretos fabricados con los geopolimeros siguen aumentando con los días.

En los resultados obtenidos se aprecia una relación entre las resistencias mecánicas, la concentración de la solución alcalina y el porcentaje de sustitución. De esta manera a medida que se aumenta la concentración de NaOH en los GC se incrementa el desempeño mecánico del material, ocurriendo lo contrario con los GP, en los cuales disminuye la resistencia a la compresión a medida que aumenta la concentración de NaOH.

El efecto negativo en las resistencias mecánicas obtenidas en la investigación, es posible atribuirlo a la presencia de un mayor contenido de sílice activa que puede dificultar la formación del gel alcalino y reducir el enlace entre las partículas [14];

además de promover un mayor consumo de metal alcalino (Na) en el proceso de policondensación, lo cual contribuye a disminuir la densidad aparente del producto final, siendo posible que el mayor contenido de álcali en el sistema conlleve a un fraguado más acelerado, lo cual impide tener tiempos adecuados de disolución y policondensación, con efecto negativo en las propiedades mecánicas. Los resultados encontrados en esta investigación presentan controversia con los reportados [45, 46], atribuyéndose estas diferencias a las características fisicoquímicas de los precursores utilizados.

3.5.2 Análisis químico (Resistencia a los sulfatos)

Las probetas geopoliméricas, sumergidas en la solución saturada de sulfato de sodio, mostraron con el tiempo desgaste en el material, disminuyendo su peso y fragmentándose más rápido, comparadas con la probeta de referencia. Estos resultados es posible que se atribuyan a la modificación de la estructura porosa, es decir, se aumentó la permeabilidad de los sulfatos sobre el concreto geopolimérico, generándose de esta manera reacciones con el hidróxido de calcio, y obteniéndose productos de mayor volumen (yeso). De este modo, dicho aumento de volumen que no pudo acomodarse en el espacio original de los poros del concreto, generó esfuerzos internos de tensión en éste, que primero lo fisuraron y luego lo desintegraron gradualmente. En el anexo Q se muestran las probetas geopoliméricas desgastadas.

3.5.3 Análisis eléctrico (Proceso de corrosión)

El análisis de corrosión se llevó a cabo en los geopolímeros que presentaron mayor resistencia mecánica, GC 12 M y GP 3 M, prosiguiéndose como se describió en la sección 2.6.3.

Como se puede apreciar en los anexos R, S y T la resistencia a la corrosión de los concretos modificados con material geopolimérico aumenta a medida que transcurre el tiempo de exposición en el medio corrosivo, mostrando una mejor

tendencia anticorrosiva en las probetas con un 20% de sustitución, observándose que al final de dicha exposición el valor de resistencia tiende alrededor de 40 kΩ para el GC 20%, 18 kΩ para el GP 20% y 4 kΩ para el patrón. De esta manera, los materiales geopoliméricos presentan una tendencia a proteger el acero, formándose una capa anticorrosiva entre el acero y el concreto. El aumento en la resistencia indicó que el material geopolimérico es mal conductor de la electricidad, generándose de esta manera, una velocidad de corrosión más baja que la del patrón.

Al inicio de la inmersión en el medio agresivo, la resistencia aumentó en ambos materiales geopoliméricos, lo que evidencia la protección del acero por parte de la capa de óxidos de productos de corrosión, formada en la superficie del acero. De 8 a 31 días de inmersión, la resistencia del acero de refuerzo presenta una disminución debido a la cantidad de cloruros alrededor del acero, lo que genera el rompimiento localizado de la capa protectora dando lugar al desgaste del material. A partir de 44 días de inmersión la resistencia aumenta, generando una capa anticorrosiva sobre el acero, disminuyendo la velocidad de corrosión. El incremento en la resistencia de corrosión en el concreto es causado por la disminución de los cloruros en el electrolito, este anión reacciona con el aluminato tricálcico presente en la mezcla de concreto, formándose el compuesto sal de Friedel ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) [24]. De esta manera los cloruros, los cuales aumentan la conductividad del concreto, al estar disueltos en el electrolito, disminuyen la conductividad y con ello la resistencia del concreto aumenta.

4 CONCLUSIONES

- Las fuentes de aluminosilicatos empleadas en la investigación presentan una elevada reactividad en la presencia de un medio altamente alcalino, donde una óptima concentración de la solución activante permite obtener materiales geopoliméricos con resistencias mecánicas de hasta 170 kg/cm² a 90 días de curado.
- La resistencia mecánica se encuentra relacionada con la concentración de solución alcalina y el porcentaje de sustitución, de esta manera a medida que aumenta la concentración de NaOH en los GC se incrementa el desempeño mecánico del material, ocurriendo lo contrario con los GP.
- Los valores obtenidos estuvieron por debajo del patrón, atribuyéndose estos resultados a la presencia de un mayor contenido de sílice activa, que conlleva a un fraguado más acelerado, lo cual impide tener tiempos adecuados de disolución y policondensación, con efecto negativo en las propiedades mecánicas.
- La sustitución del agregado fino por el geopolímero, permite observar que el polímero inorgánico, afecta la resistencia del concreto, a expensas de saber que el agregado fino le confiere al concreto la mayor cantidad de resistencia junto con el agregado grueso.
- La disolución de la fuente de aluminosilicatos puede ser vista a través de los cambios de los difractogramas DRX y espectros FTIR de la materia prima y los geopolimeros obtenidos, los cuales presentan fase amorfa.
- La técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica EIS, permite identificar el estado superficial de corrosión del acero de refuerzo. La identificación del estado superficial de corrosión del acero es respaldada

por la técnica de inspección visual y el estado de la superficie en que se encuentra el acero antes de ser embebido en el concreto.

- El incremento en la resistencia a la corrosión en el concreto es causado por la disminución de los cloruros en el electrolito, anión que reacciona con el aluminato tricálcico presente en la mezcla de concreto, el cual forma una sal. De esta manera los cloruros se disuelven, disminuyen la conductividad y con ello aumenta la resistencia a la corrosión del concreto.
- Las probetas geopoliméricas, presentan un desgaste más acelerado que el patrón cuando se encuentran sumergidas en una solución saturada de sulfato de sodio, disminuyen su peso y se fragmentan más rápido. Este desgaste se atribuye a la modificación de la estructura porosa, aumentando de esta manera, la permeabilidad de los sulfatos sobre el concreto geopolimérico
- Los geopolímeros ofrecen una disminución en la emisión de grandes volúmenes de sustancias en estado gaseoso (CO_2 y gases de NO_x y SO_x), que se obtienen durante el proceso de clinkerización, siendo su finalidad sustituir un porcentaje del cemento utilizado para la elaboración del concreto, logrando de esta manera, construir un concreto verde, que no ocasione ningún daño al medio ambiente.

5 RECOMENDACIONES

- Continuar con la investigación, utilizando otros precursores de aluminosilicatos variando las condiciones de temperatura y diferentes tiempos de síntesis.
- Establecer la sustitución límite de cemento por el material geopolimérico para el aumento en la resistencia a la compresión.
- Evaluar el desempeño de la geopolimerización, cuando se varían las relaciones de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ del precursor aluminosilicato.
- Realizar la geopolimerización variando el agente activador, es decir, utilizando otros metales alcalinos diferentes al Sodio.
- Analizar el proceso de corrosión a un tiempo más prolongado y en macro escala.
- Validar y estandarizar el método empleado para la obtención de los materiales geopoliméricos.

6 BIBLIOGRAFÍA

1. KOSTAS K. and DIMITRA Z. Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. En: Minerals engineering. ELSEVIER. Vol. 20 (2007) p. 1262-1277.
2. MEJIA R., BERNAL S. and RODRIGUEZ E. Nuevos concretos para el aprovechamiento de un sub-producto industrial. 2006. Congreso Iberoamericano de metalurgia y materiales, Habana, Cuba. p. 517-523.
3. XU H., VAN DEVENTER J. and LUKEY G. Effect of alkali metals on the preferential Geopolymerisation of stilbite/kaolinite mixtures. En: Industrial and Engineering chemistry research. Vol. 40 (2001) p. 3749-3756.
4. VAN JAARSVELD J. and VAN DEVENTER J. Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based geopolymers. En: Industrial and Engineering chemistry research. Vol. 38 (1999) p. 3932-3941.
5. VAN JAARSVELD J., VAN DEVENTER J. and LUKEY G. The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite-based geopolymers. En: Journal chemical engineering. ELSEVIER. Vol. 89 (2002) p. 63-73.
6. SKVARA F., JILEK T. and KOPECKY L. Geopolymer materials based on fly ash. En: ceramics-silikaty. Vol. 49 (2005) p. 195-204.
7. SINDHUNATA J. A conceptual model of Geopolymerisation. (2006) Requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Department of Chemical and Biomolecular Engineering, the University of Melbourne, Australia. 2006.
8. DAVIDOVITS J. Global warming impact on the cement and aggregates industries. En: World Resource Review. Vol. 6 (1994) p. 263-278.
9. DAVIDOVITS J. and DAVIDOVICS M. Geopolymer: room-temperature ceramic matrix for composites. En: Ceramics Engineering Science Process. Vol. 9 (1998) p. 835-842.
10. DAVIDOVITS J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. En: Journal of Thermal Analysis. Vol. 37 (1991) p. 1633-1656.

11. DAVIDOVITS J. Chemistry of geopolymeric systems, terminology. En: The Proceedings of Geopolymere '99, St. Quentin, France, (1999) p. 9-39.
12. XU H. and VAN DEVENTER J. Microstructural characterisation of geopolymers synthesised from kaolinite/stilbite mixtures using XRD, MAS-NMR, SEM/EDX, TEM/EDX and HREM. En: Cement and Concrete Research. Vol. 32 No. 11 (2002) p. 1705-1716.
13. MCCORMICK A. and BELL A. The solution chemistry of zeolite precursors. En: Catalysis Reviews - Science and Engineering. Vol.31 No. 1-2 (1989) p. 97-127.
14. LEE W. and VAN DEVENTER J. Structural reorganisation of class F fly ash in alkaline silicate solutions. En: Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. Vol. 211 No.1 (2002) p. 49-66.
15. GARCÍA L. Introducción al Método Rietveld. Universidad Nacional Autónoma de México, Septiembre de 2007.
16. MOLINA O., MORAGUES A., y GÁLVEZ J. La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento Portland en la durabilidad del hormigón: propiedades físicas, difusión del Ion Cloruro y del dióxido de carbono. En: Anales de Mecánica de la fractura 25. Vol. 2 (2008) p. 575-580.
17. GEOPÓMEZ S.A, Distribuidora de piedra pómez. Ficha de seguridad piedra pómez.
18. HERNÁNDEZ J. y HERNÁNDEZ M. Evaluación estructural y eléctrica de los polímeros conductores de anilina y pirrol dopados con cenizas volantes y clinker. 2009, trabajo de grado (Química). Universidad Industrial de Santander.
19. BARBOSA V., MACKENZIE K. and THAUMATURGO C. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. En: International Journal of Inorganic Materials. Vol. 2 (2000) p. 309-317.
20. GRANIZO M. and BLANCO M. Alkaline activation of metakaolin: An isothermal conduction calorimetry study. En: Journal of Thermal Analysis. Vol. 52 (1998) p. 957-965.
21. PALOMO A., BLANCO-VARELA M., GRANIZO M., PUERTAS F., VAZQUEZ T. and GRUTZECK M. Chemical stability of cementitious materials based on

- metakaolin. En: Cement and Concrete Research. Vol. 29 No. 7 (1999) p. 997-1004.
22. CIFUENTES A. y FERRER C. Análisis del comportamiento mecánico a edades tardías del concreto hidráulico con adición de cenizas volantes de Termopaipa. 2006, trabajo de grado (Ingeniería Civil). Universidad Industrial de Santander.
 23. SANCHEZ D. Tecnología del concreto y del mortero. Segunda edición, 1993, Bhandar Editores Ltda, p. 27-56.
 24. HERRERA C. Aplicación de la técnica de espectroscopia de impedancia en el estudio del comportamiento electroquímico del sistema acero-concreto bajo inmersión parcial aireada. 2004, trabajo de grado (Física). Universidad Industrial de Santander.
 25. EDUCAR CULTURAL RECREATIVA. Gran enciclopedia temática La Clave del Saber. Bogotá: Educar Cultural Recreativa Ltda., 1985. Vol. 10, p. 10.
 26. ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, SECCIONAL COLOMBIANA DEL AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Ensayos y Control de Calidad del Acero de Refuerzo. Santafé de Bogotá, 1994, p.1-4.
 27. POLONIO B. Métodos de difracción de rayos X, principios y aplicaciones. Ediciones Pirámide S.A, Madrid, 1981.
 28. PETRICK S. y CASTILLO R. Método de Rietveld para el estudio de estructuras cristalinas. Universidad Nacional Autónoma de México. México 2004.
 29. SKOOG D. y WEST D. Análisis Instrumental. Ed. Interamericana, México 1984.
 30. YOUNG R. Introduction to the Rietveld method. International Union of Crystallography. Oxford University. (1993), p.21-22.
 31. TECNOCONCRETOS S.A. Normas Técnicas. Diseño de mezclas. Bogotá: Tecbo co.
 32. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, ICONTEC, Agua para la elaboración de concreto. NTC 3459.
 33. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, ICONTEC 321, Especificaciones químicas del cemento portland.

34. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN, ICONTEC, Método para determinar la gravedad específica y la absorción de agregados gruesos. NTC 176.
35. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN, ICONTEC, Método para determinar la gravedad específica y la absorción de agregados finos. NTC 237.
36. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN, ICONTEC, Suelos. Ensayo para determinar el contenido de humedad. NTC 1495.
37. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN, ICONTEC, Ingeniería civil y arquitectura. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio. NTC 1377.
38. ESPECIFICACIONES Y NORMAS DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, I.N.V, Instituto Nacional de Vías, 2007. Sanidad de los agregados frente a la acción de las soluciones de sulfato de sodio o de magnesio. I.N.V. E-220-07.
39. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN, ICONTEC, Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto. NTC 673.
40. ASTM, Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in corrosion Testing. ASTM, 2004 (ASTM G3-89).
41. ORTIZ L., CUMBRERA L., SANCHEZ F., GUIBERTEAU F. And CARUSO R. Fundamental parameters approach in the Rietveld method: a study of the stability of results versus the accuracy of the instrumental profile. En: J. Eur. Ceram. Soc. (2000) p. 1845-1851.
42. RODRIGUEZ E., GUTIÉRREZ R., BERNAL S. y GORDILLO M. Síntesis y caracterización de polímeros inorgánicos obtenidos a partir de la activación alcalina de un metacaolín de elevada pureza. En: Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. Vol. S1 No. 2 (2009) p. 595-600.
43. DAVIDOVITS J. Geopolymers: Man-Made Rock geosynthesis and the resulting development of very early high strength cement. En: J. Materials Education. Vol. 16 (1994) p. 91-139.

44. DAVIDOVITS J. 30 years of successes and failures in geopolymer applications market trends and potential breakthroughs. Geopolymer (2002) conference, October 28-29, Melbourne, Australia, p. 1-16.
45. JIRASIT F., RUSCHER C. and LOHAUS L. A study on the substantial improvement of fly ash-based geopolymeric cement with the addition of metakaolin. International conference on pozzolan, concrete and geopolymer Khon Kaen, Thailand, May 24-25 (2006) p. 247-261.
46. SOFI M., VAN DEVENTER J.S.J., MENDIS P. and LUKEY G. Engineering properties of inorganic polymer concrete (IPCs). En: Cement and Concrete Research. Vol. 37 (2007) p. 251-257.
47. ESPECIFICACIONES Y NORMAS DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, I.N.V, Instituto Nacional de Vías, 2007. Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos. I.N.V. E-213-07.
48. BELEÑA I., TENDERO M.J.L. and TAMAYO D. Estudio y optimización de los parámetros de reacción para la obtención de material geopolimérico. En: Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Vol. 43 No. 2 (2004) p. 569-572.
49. WEIL M., GASAFI E., BUCHWALD A. and DOMBROWSKI K. Sustainable design of geopolymers-integration of economic and environmental aspects in the early stages of material development. 11th Annual International Sustainable Development Research Conference, Helsinki, Finland (2005).
50. PHAIR J. and VAN DEVENTER J.S.S. Characterization of Fly-Ash-Based Geopolymeric Binders Activated with Sodium Aluminate. En: Industrial Engineering Chemistry Research. Vol. 41 No. 17 (2002) p. 4242-4251.
51. HARDJITO D. and RANGAN B. Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. Research Report GC, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia (2005).
52. ZHANG Z., YAO X. and ZHU H. Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete I. Basic properties. En: Applied Clay Science. (2010) p. 1-6.

53. SINDHUNATA, PROVIS J., LUKEY G., XU H. and VAN DEVENTER J.S.J. Structural Evolution of Fly Ash Based Geopolymers in Alkaline Environments. En: Industrial Engineering Chemistry Research. Vol. 47 No. 9 (2008) p. 2991-2999.
54. DAVIDOVITS J. Properties of geopolymer cements. En: Alkaline Cements and Concretes (1994) p. 131-149.
55. XU H. and VAN DEVENTER J.S.J. The Geopolymerisation of alumino-silicate minerals. En: International Journal of Mineral Processing. Vol. 59 (2000) p. 247-266.
56. DUXSON P., PROVIS J., LUKEY G. and VAN DEVENTER J.S.J. The role of inorganic polymer technology in the development of green concrete. En: Cement and Concrete Research. Vol. 37 (2007) p. 1590-1597.
57. TAVOR D., WOLFSON A., SHAMAEV A. and SHVARZMAN A. Recycling of Industrial Wastewater by its Immobilization in Geopolymer Cement. En: Industrial Engineering Chemistry Research. Vol. 46 No. 21 (2007) p. 6801-6805.
58. PROVIS J.L. Modelling the Formation of Geopolymers. Requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Department of Chemical and Biomolecular Engineering, the University of Melbourne. March, 2006.
59. KLABPRASIT T., JATURAPITAKKUL C., CHALEE W., CHINDAPRASIRT P. and SONGPIRIYAKIJ S. Influence of Si-Al ratio on compressive strength of rice husk-bark ashes and fly ash-based geopolymer paste. The 3rd ACF International Conference- ACF/VCA (2008) p. 151-157.
60. DAVIDOVITS J and DAVIDOVICS M. Fire resistant aluminosilicate composites. En: Fire and Materials. Vol. 21 (1997), p. 67-73.
61. ROVNANÍK P. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin based geopolymer. En: Construction and Building Materials. (2010), p. 1-8.
62. SANTAELLA L. and SALAMANCA R. Comportamiento del concreto con bajos porcentajes de ceniza volante (Termopaipa IV) y agua constante. En: Ciencia e Ingeniería Neogranadina. No. 14 (2004) p. 1-7.

63. VALDEZ P., DURÁN A., RIVERA J. y JUÁREZ C. Concretos fluidos con altos volúmenes de ceniza volante. En: Ciencia UANL. Vol. X, No. 1 (2007), p. 49-58.
64. SWANEPOEL J.C. and STRYDOM C.A. Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. En: Applied Geochemistry. Vol. 17 (2002) p. 1143-1148.
65. FLETCHER R., MACKENZIE K., NICHOLSON C. and SHIMADA S. The composition range of aluminosilicate geopolymers. En: Journal of the European Ceramic Society. Vol. 25 (2005) p. 1471-1477.
66. REES C., PROVIS J., LUKEY G. and VAN DEVENTER J.S.J. The mechanism of geopolymer gel formation investigated through seeded nucleation. En: Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects. Vol. 318 (2008) p. 97-105.
67. PANNUNZIO-MINER E., VILLEGAS M. y CARBONIO R. Análisis cuantitativo de las fases presentes en cemento Portland y Clinker por Medio de Análisis Rietveld de Patrones de Difracción de Rayos X de Polvos. En: Matéria. Vol. 8 No. 3 (2003) p. 270-276.
68. Guía de patologías constructivas, estructurales y no estructurales. Anexo 1. Catalogo de patologías en concreto y mampostería estructurales. Fondo de prevención y atención de emergencias. Versión 1.0. Junio 5 de 2004.
69. PETERSON V. Diffraction investigations of cement clinker and tricalcium silicate using Rietveld analysis. Requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Department of Chemistry, Materials and Forensic Sciences, the University of Technology, Sydney. 2003.
70. CASAGRANDE S. and CASTILLO R. Método de Rietveld para el estudio de estructuras cristalinas. Laboratorio de Datación, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería. 2004.
71. ORTIZ L., CUMBRERA L., SANCHEZ F., GUIBERTEAU F. and CARUSO R. Fundamental parameters approach in the Rietveld method: a study of the stability of results versus the accuracy of the instrumental profile. En: J. Eur. Ceram. Soc. (2000) p. 1845-1851.

ANEXOS

Anexo A Composición química de las cenizas obtenidas en diferentes países.

Fase %	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	Na₂O	K₂O	SO₃	P₂O₅	TiO₂
S. África	41.50	37.20	2.45	9.95	2.27	0.53	0.83	0.50	1.35	2.65
Australia	50.78	31.28	4.87	0.73	2.58	0.17	0.49		0.07	2.47
China	43.52	20.53	10.47	8.26	2.52	1.19	1.25			0.91
Colombia	53.90	28.00	6.53	4.73	1.47	0.66	1.77	0.40	0.76	1.92
Grecia	26.00	10.60	6.59	42.10	1.48	0.17	0.80	5.57		
India	58.12	29.20	6.40	1.69	0.86	0.14	1.23	Trazas		
Indonesia	34.21	15.19	5.91	13.52	5.61	6.88	1.14			0.71
Japón	57.50	26.10	4.00	5.10	1.30	1.50	1.35	0.40		
Netherlands	50.46	25.74	6.53	4.32	2.24	2.04	4.43			
Filipinas	46.16	31.91	8.67	6.85	1.52	1.47	0.85			1.62
Polonia	50.80	23.90	8.60	3.60	2.80	0.80	2.90	0.80		
Arabia S.	52.30	25.20	4.60	10.00	2.20	0.60				
España	49.80	17.30	8.70	24.90	1.90	0.30	1.70	4.30		
Taiwán	48.75	23.21	4.15	3.93	1.00	0.24	1.10			
Tailandia	51.17	25.15	8.57	5.82	1.89	0.36	2.73			
Turquía	27.40	12.80	5.50	47.00	2.50	0.20	0.20	6.20		
Ucrania	50.09	28.10	11.70	1.62	1.54	0.28	0.62			
USA	52.24	19.01	15.71	4.48	0.89	0.82	2.05	1.34		
Yugoslavia	52.56	26.33	6.81	5.96	2.21	0.24	1.14	1.02		

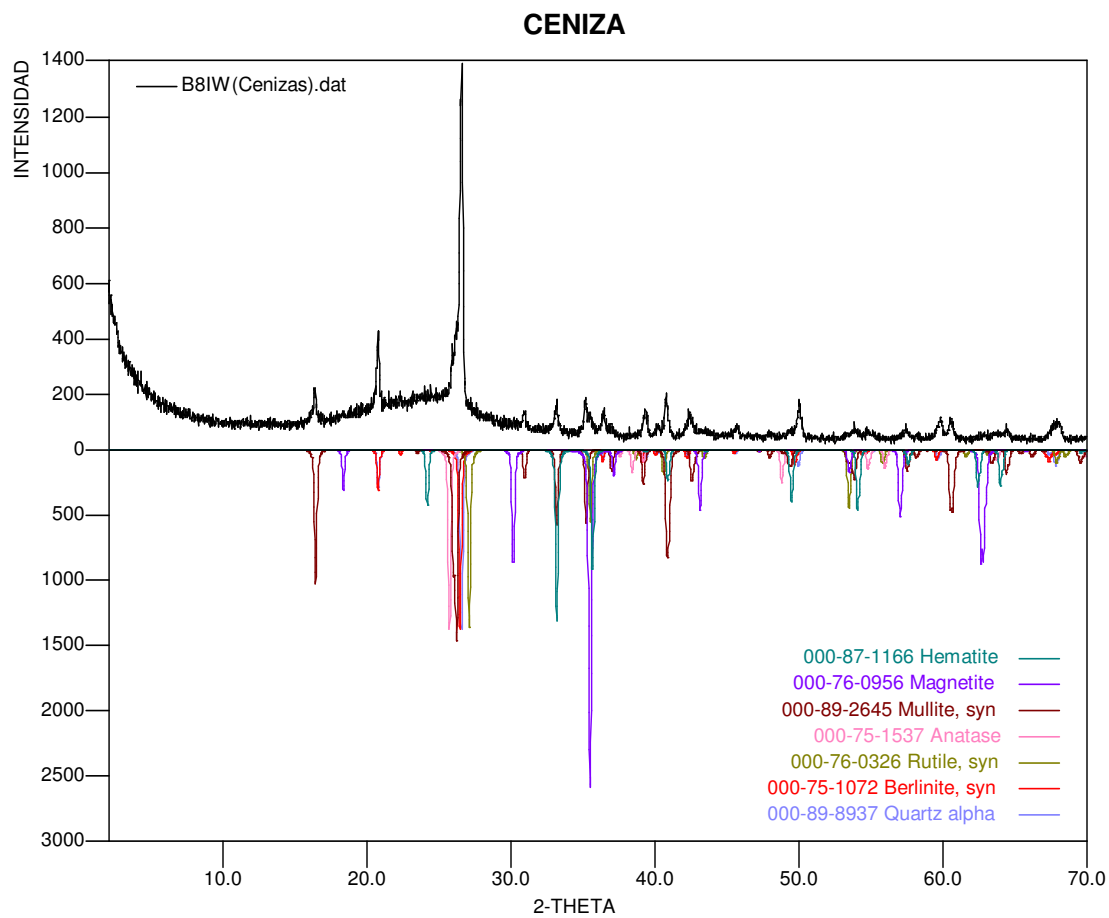
Fuente: HERNANDEZ J y HERNANDEZ M. Evaluación estructural y eléctrica de los polímeros conductores de anilina y pirrol dopados con cenizas volantes y clinker [18].

Anexo B Composición química general de la Piedra pómez.

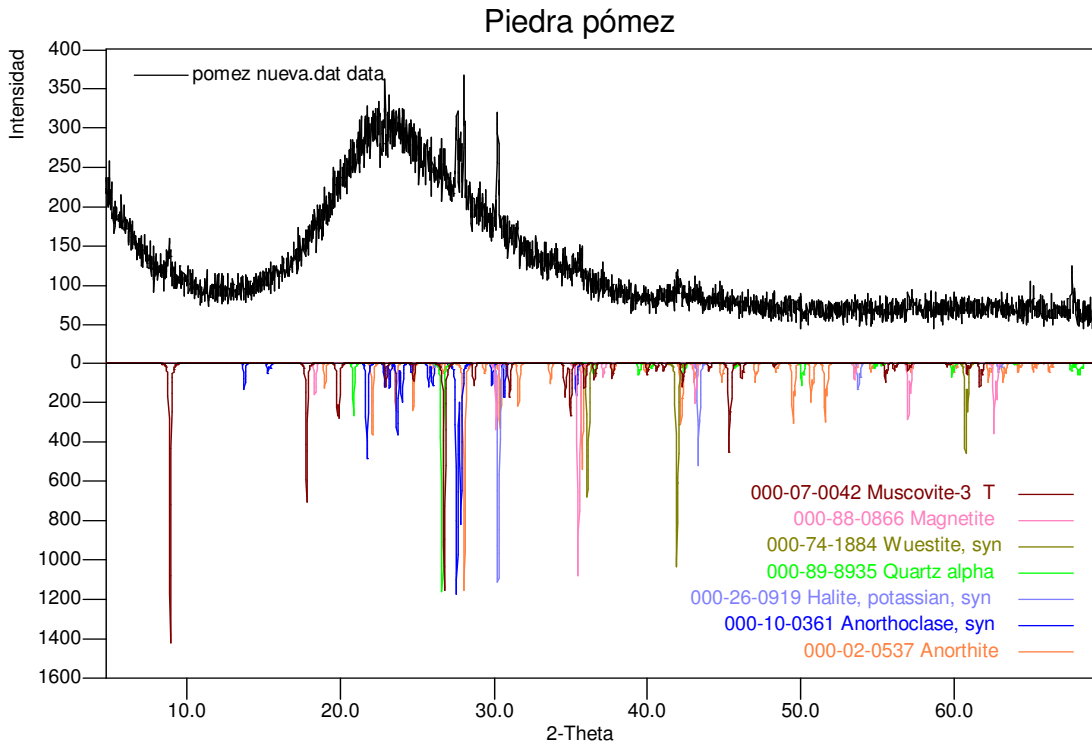
Componente	%
SiO ₂	71.00
Al ₂ O ₃	12.80
Fe ₂ O ₃	1.75
CaO	1.36
Na ₂ O	3.23
K ₂ O	3.83
H ₂ O	3.88

Fuente: Ficha de seguridad piedra pómez, Geopómez S.A, distribuidora de piedra pómez.

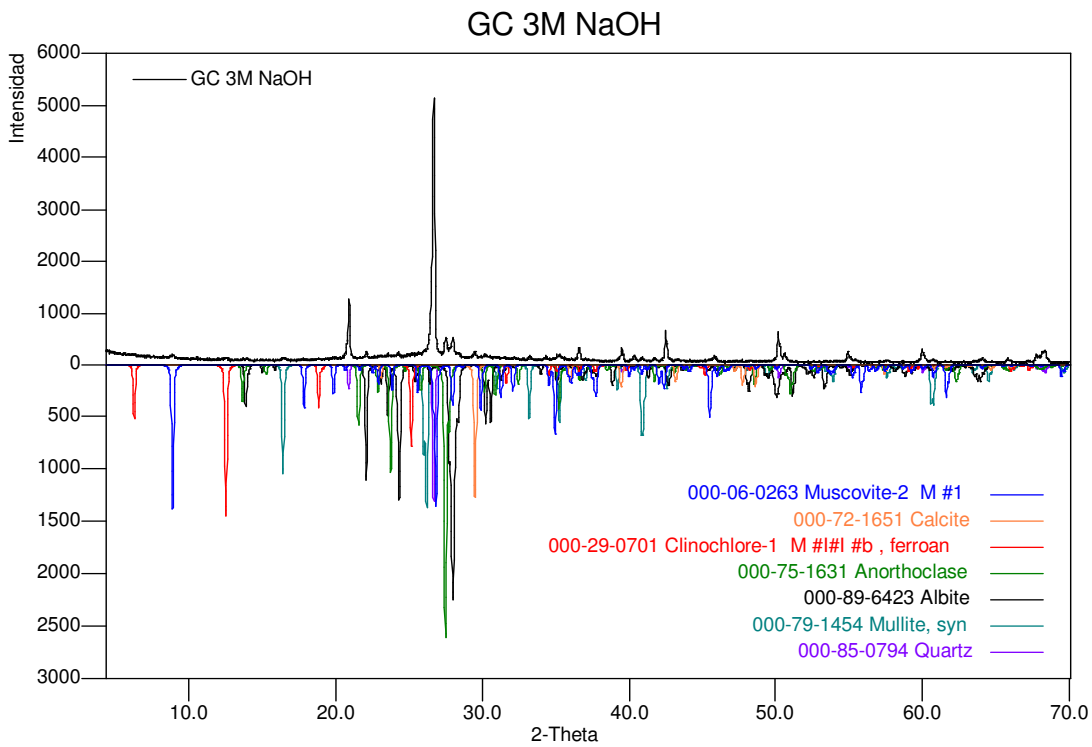
Anexo C Análisis cualitativo de las cenizas.



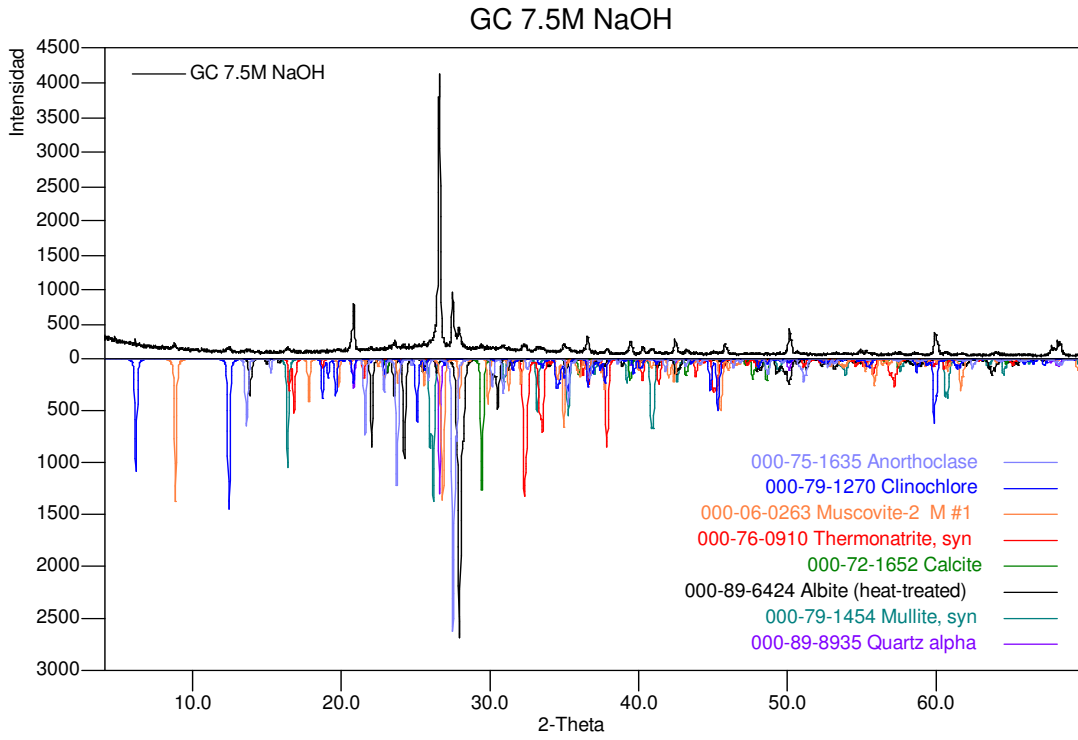
Anexo D Análisis cualitativo de la piedra pómez.



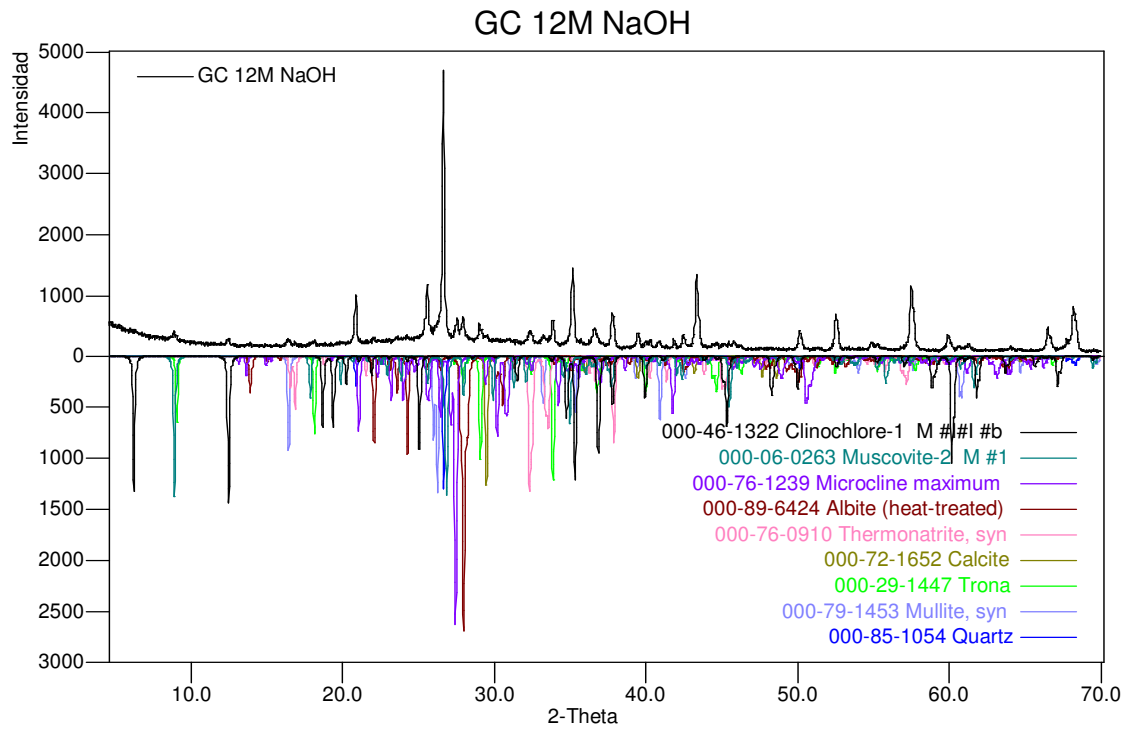
Anexo E Análisis cualitativo del GC 3M.



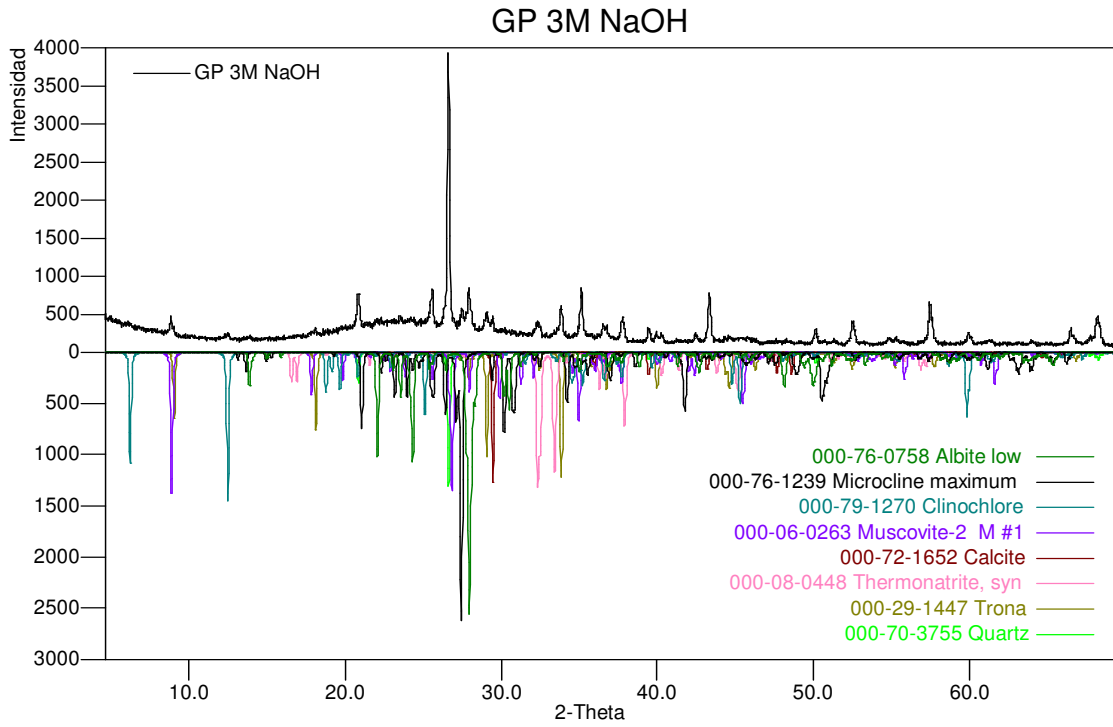
Anexo F Análisis cualitativo del GC 7.5M.



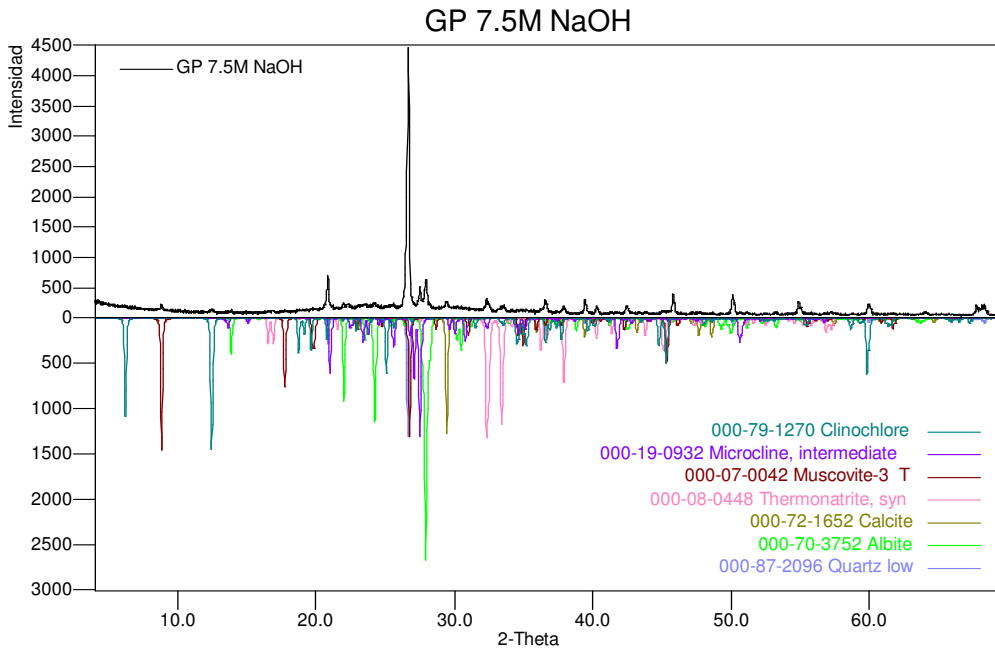
Anexo G Análisis cualitativo del GC 12M.



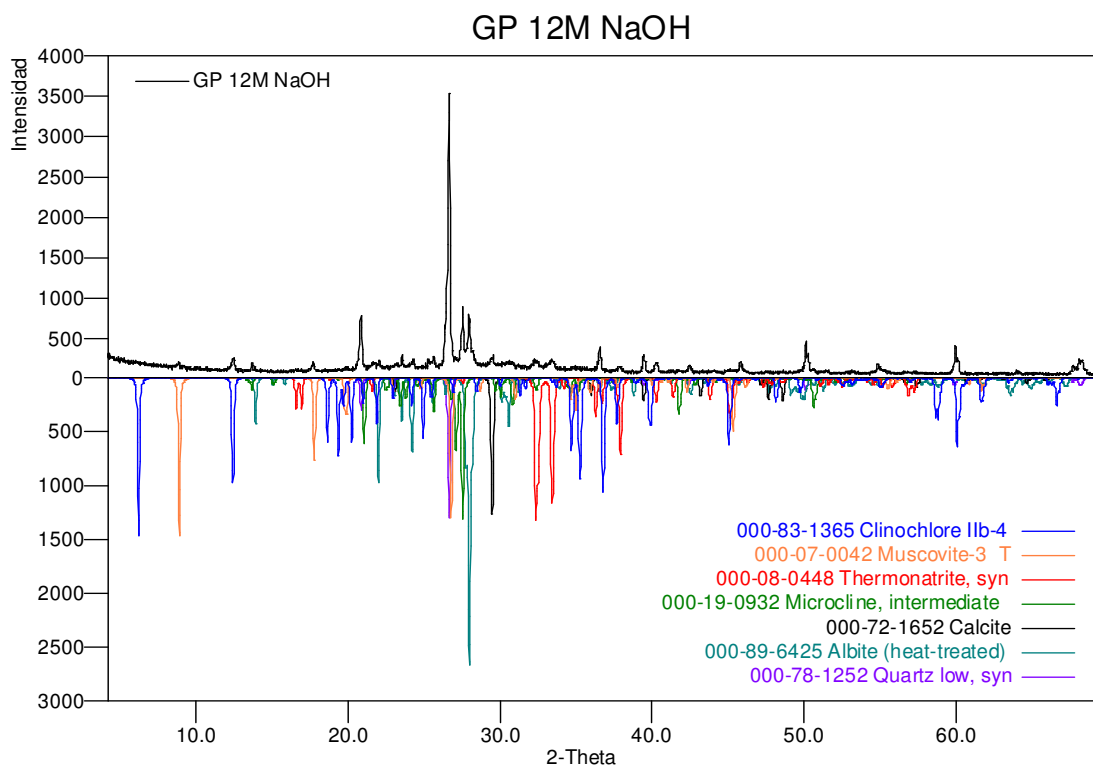
Anexo H Análisis cualitativo del GP 3M.



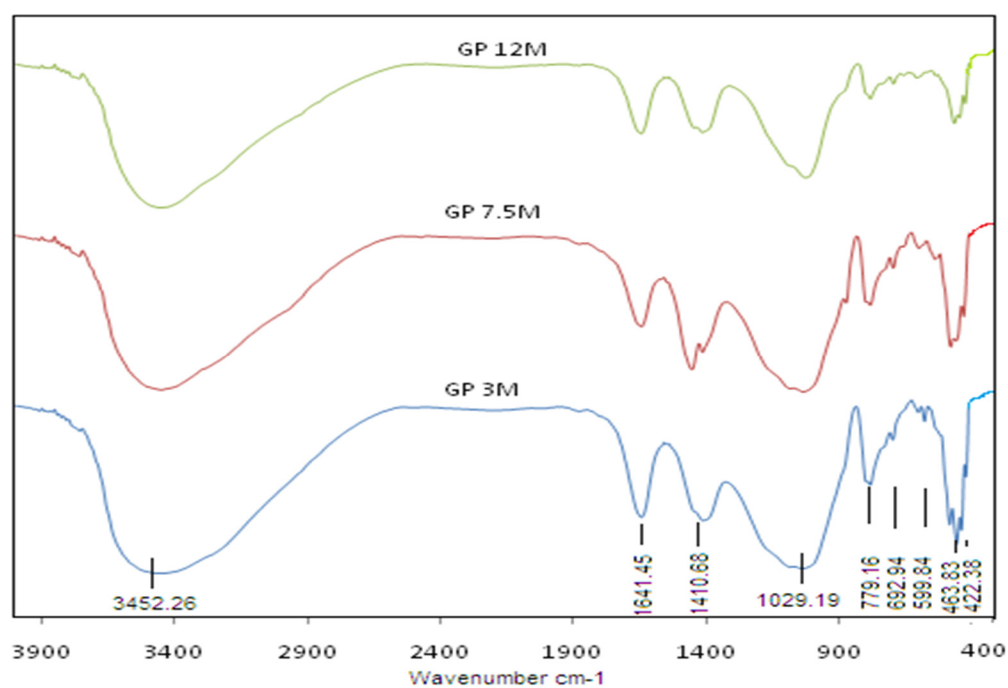
Anexo I Análisis cualitativo del GP 7.5M.



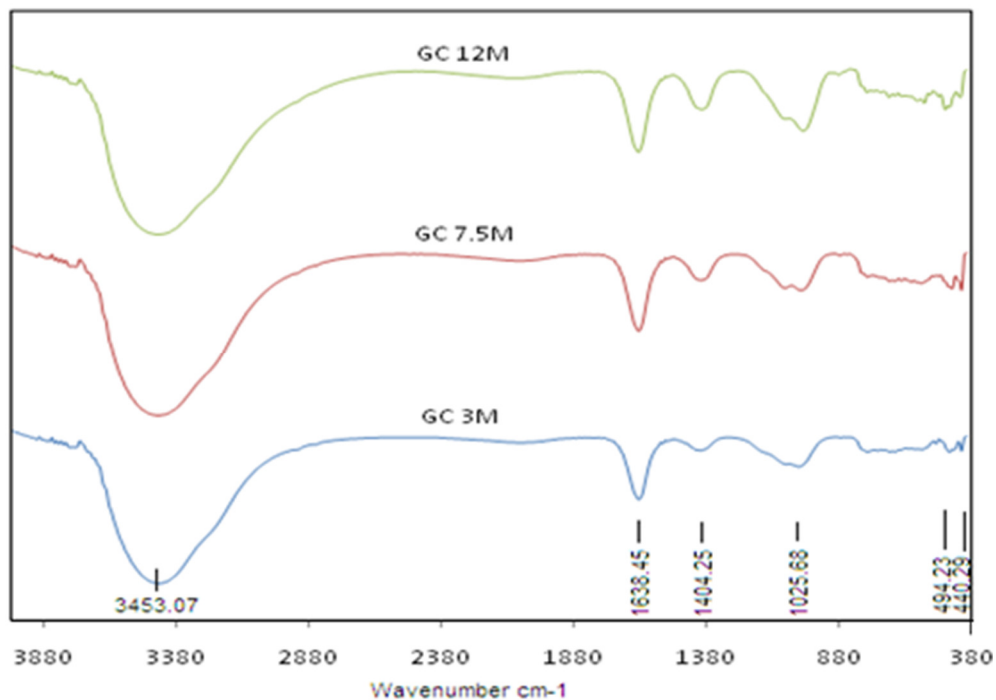
Anexo J Análisis cualitativo del GP 12M.



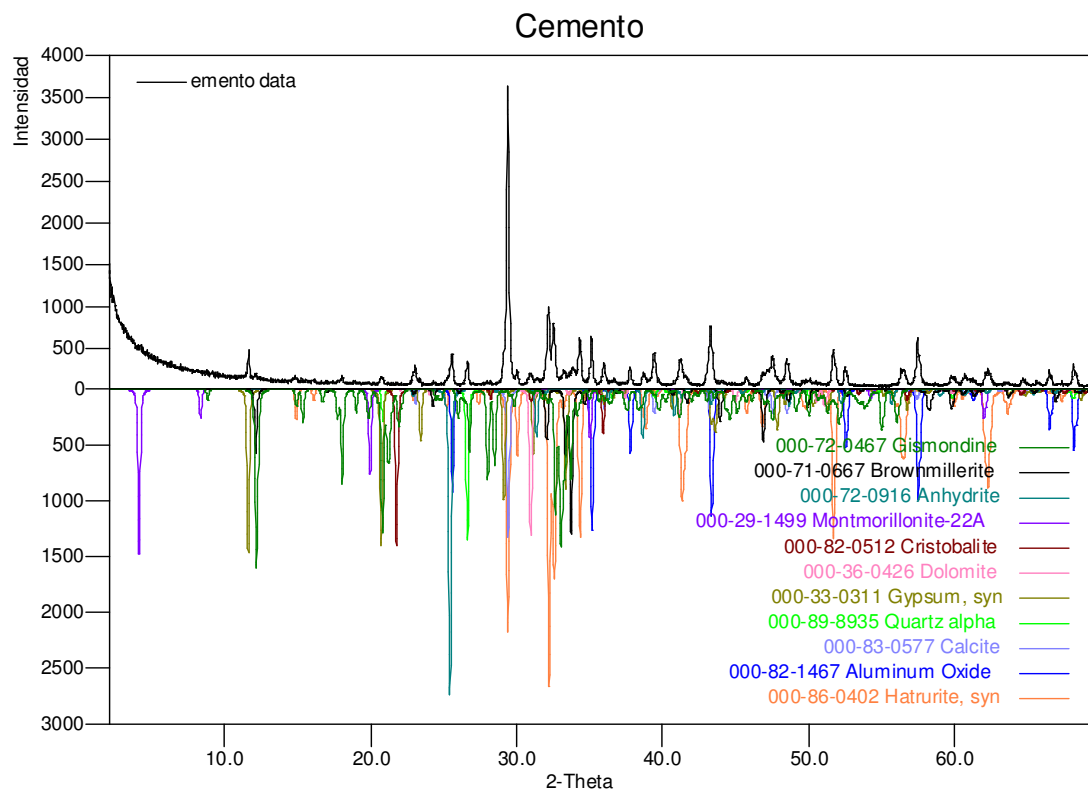
Anexo K Espectro infrarrojo de los GP.



Anexo L Espectro infrarrojo de los GC.



Anexo M Análisis cualitativo del Cemento.



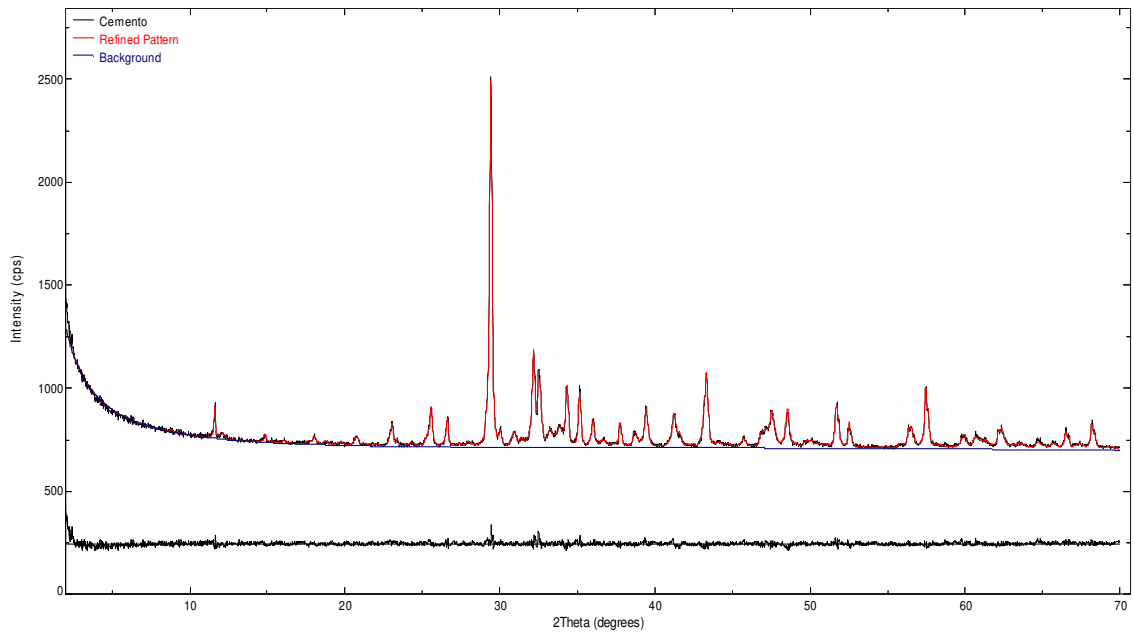
Anexo N Resultados del refinamiento del Cemento.

Cemento									
Fases*	Ha	Ca	Gi	Br	Gy	Do	Cu	An	
ICSD**	81100	79673	15838	9197	2057	27540	174	16382	
Variables Refinadas									
a (Å)	12,2236(9)	4,9840(2)	10,041(2)	5,577(2)	5,635(1)	4,830(1)	4,9104(7)	7,026(1)	
b (Å)	7,0716(5)	4,9840(2)	10,698(3)	14,558(6)	15,187(2)	4,830(1)	4,9104(7)	6,997(2)	
c (Å)	9,2941(6)	17,041(1)	9,823(2)	5,293(2)	6,581(1)	16,022(8)	5,414(1)	6,227(2)	
α (°)	90	90	90	90	90	90	90	90	
β (°)	116,230(6)	90	92,48(3)	90	118,90(1)	90	90	90	
γ (°)	90	120	90	90	90	120	120	90	
V (Å³)	720,667	366,601	1054,326	429,853	493,110	323,814	113,058	306,210	
ρ (g/cm³)	3,156	2,720	2,156	3,755	2,265	2,837	2,647	2,953	
FWHM	U	0,2894	0,4280	0	0	0	0	0	0
	V	0,2266	0,1818	0	0	0	0	0	0
	W	0,0685	0,0336	0,0655	0,1514	0,0091	0,0519	0,0184	0,0083
R_B (%)	4,34	4,37	7,50	6,65	8,16	5,13	4,18	7,24	
R_P (%)	10,51								
R_{WP} (%)	16,42								
Bondad del Ajuste	1,32								
% DRX (cuantitativo)	30,5	24,0	14,6	6,2	3,5	2,7	2,5	1,0	
% Amorfo	15								

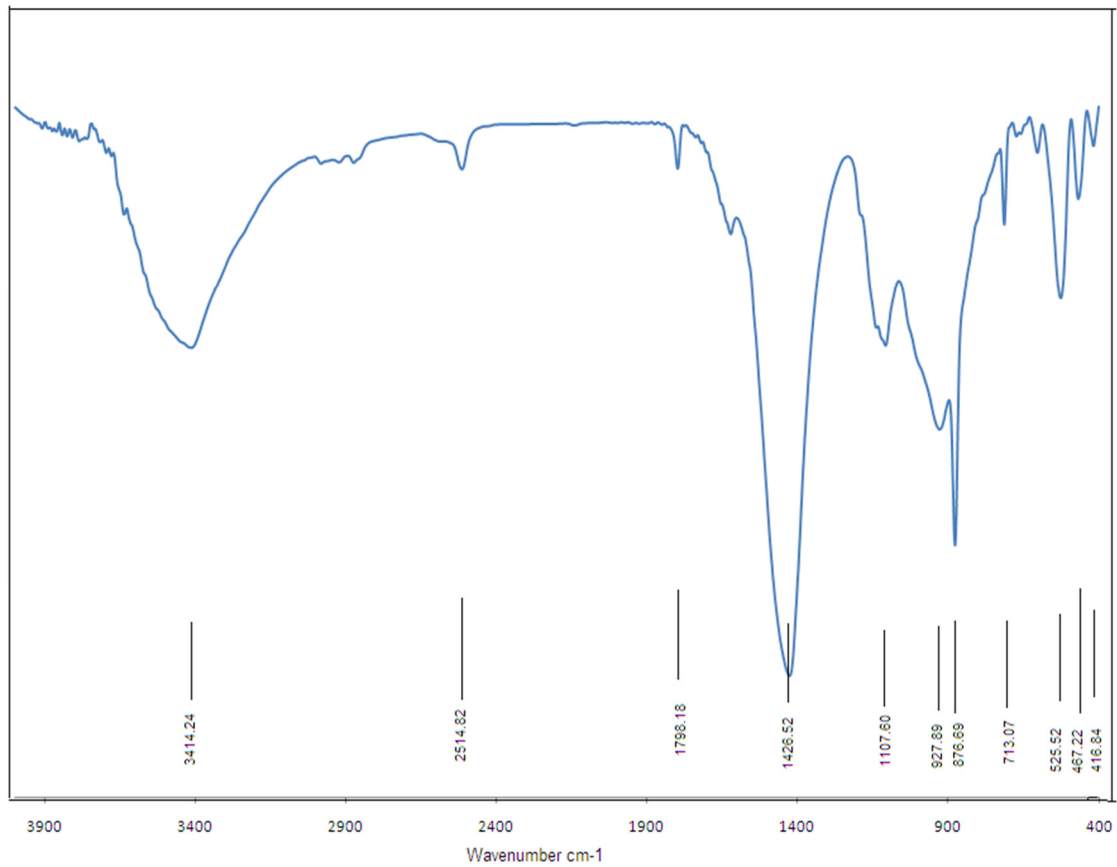
*Fases: Ha= Hattrurita; Ca= Calcita; Gi=Gismondina; Br= Brownmillerita; Gy= Gypsum; Do= Dolomita; Cu= Cuarzo low; An= Anhidrita.

**ICSD: Inorganic Crystal Structure Database.

Anexo O Difractograma refinado del Cemento.



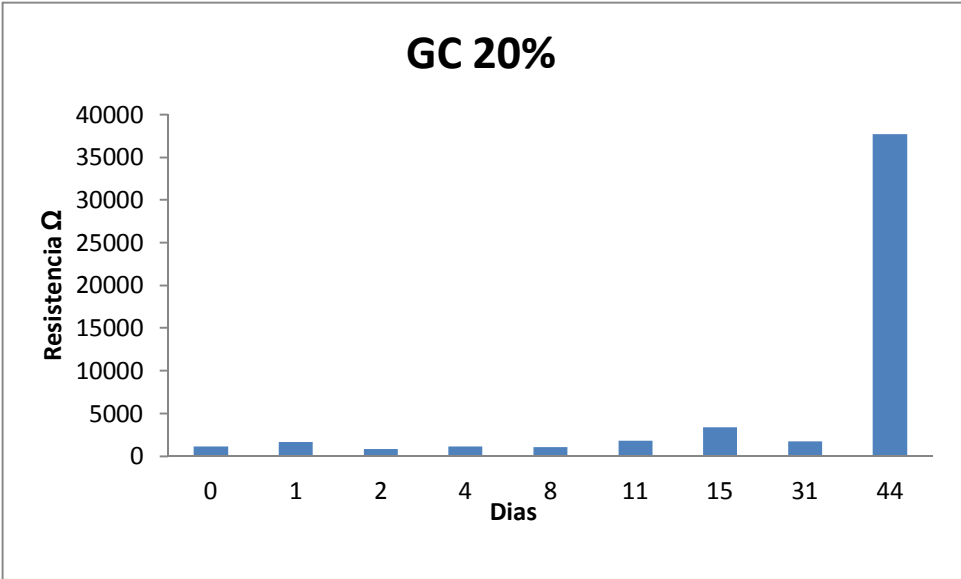
Anexo P Espectro infrarrojo del Cemento.



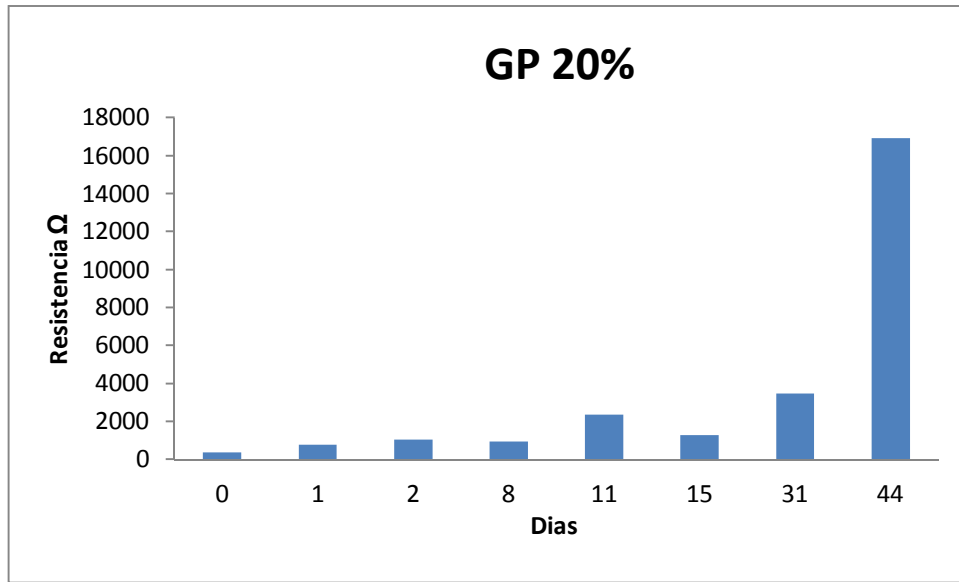
Anexo Q Probetas desgastadas por la solución saturada de sulfato de sodio.



Anexo R Resistencia a la corrosión del concreto con el 20% de GC 12M.



Anexo S Resistencia a la corrosión del concreto con el 20% de GP 3M.



Anexo T Resistencia a la corrosión del concreto patrón.

